

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ**  
**КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ**  
**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2019**

УДК 681.587.72:004(075.8)  
С91

**Автори:**

**Павленко Тетяна Павлівна**, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

**Шавкун Вячеслав Михайлович**, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

**Козлова Ольга Сергіївна**, старший викладач кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

**Лукашова Наталя Павлівна**, асистент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

**Рецензенти:**

**Сінчук Олег Миколайович**, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету;

**Заблодський Микола Миколайович**, доктор технічних наук, професор кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України

*Рекомендовано до друку Вченою Радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,  
протокол № 1 від 30 серпня 2019 р.*

**Сучасні електромехатронні комплекси і системи** : навч. посібник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 116 с.

ISBN 978-966-695-502-2

Навчальний посібник складено для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка з метою допомоги під час підготовки до занять та екзаменів із дисциплін «Системи електропостачання в електромехатронних комплексах» та «Сучасні технології діагностики електромехатронних систем транспортних засобів»

УДК 681.587.72:004(075.8)

ISBN 978-966-695-502-2

© Т. П. Павленко, В. М. Шавкун,  
О. С. Козлова, Н. П. Лукашова, 2019  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019

## ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
	ВСТУП.....	7
1	МЕХАТРОНІКА ТА ЇЇ СКЛАДОВІ ЕЛЕМЕНТИ.....	8
1.1	Головні поняття та історія розвитку мехатроніки.....	8
1.2	Об'єкти та елементи мехатроніки в транспортних засобах.....	12
1.3	Мехатронні модулі та системи.....	14
1.4	Структурні бази мехатроніки.....	20
1.5	Прилади та засоби діагностування електромехатронних модулів і систем.....	23
	Контрольні питання.....	25
2	ПРИНЦИПИ Й РІВНІ РОЗВИТКУ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ.....	27
2.1	Принципи будови мехатронних систем.....	27
2.2	Структура побудови та рівні інтеграції електромехатронних систем.....	29
2.3	Структура діагностичних систем.....	32
2.4	Засоби діагностики мехатронних систем.....	38
	Контрольні питання.....	42
3	НАПРЯМИ ТА ПРИНЦИПИ РОЗВИТКУ МОДУЛІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	43
3.1	Етапи й закони процесу еволюційного розвитку модулів технічних систем.....	43
3.2	Тенденції розвитку технічних модульних систем.....	45
3.3	Принципи побудови мехатронних модулів робототехнічних систем.....	47

3.4	Принципи робототехніки та розвиток пріоритетних напрямів технічних модульних систем.....	51
	Контрольні питання.....	53
4	ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ .....	55
4.1	Головні поняття та терміни теорії надійності.....	55
4.2	Методи прогнозування надійності.....	56
4.3	Етапи та задачі надійності.....	57
4.4	Прогнозування технічного стану електромехатронних систем.....	59
	Контрольні питання.....	67
5	МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ РУХОМОГО СКЛАДУ.....	68
5.1	Технічні засоби діагностики.....	68
5.2	Сучасне обладнання діагностики транспортних засобів.....	70
5.3	Види діагностики технічних засобів і їхні параметри.....	72
5.4	Автоматизовані діагностичні системи.....	74
	Контрольні питання.....	83
6	ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ ТА МОДУЛІ.....	84
6.1	Модульні системи електромехатронних комплексів.....	84
6.2	Сучасне керування в електромехатронних модулях та комплексах.....	87
6.3	Роботизовані електромехатронні системи та модулі.....	90
	Контрольні питання.....	95

7	МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ.....	96
7.1	Базові положення теорії моделювання.....	96
7.2	Автоматизація моделювання динаміки мехатронної системи.....	98
7.3	Порівняльний аналіз методів динаміки.....	99
7.4	Метод зв'язкових графів.....	102
7.5	Моделювання та автоматизація динаміки систем з використанням методу зв'язкових графів.....	106
	Контрольні питання.....	112
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	114
	ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	116

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВДЖ	– вторинне джерело живлення
ВМЛ	– вихідна механічна ланка
ЕМП	– електромеханічний перетворювач
ЕС	– експертна система
ІММ	– інтелектуальна мехатронна машина
ІММД	– інтелектуальний мехатронний модуль
ІММР	– інтелектуальний мехатронний модуль руху
МД	– модуль руху
МЕМС	– мехатронна електромеханічна система
ММР	– мехатронний модуль руху
МС	– мехатронна система
ОК	– об'єкт керування
САПР	– система автоматизованого проектування
СДФ	– система функціонального діагностування
СНП	– силовий напівпровідниковий перетворювач
ТЗ	– транспортний засіб
ТЗД	– технічний засіб діагностики
ЦАП	– цифроаналоговий перетворювач

## ВСТУП

Пріоритетним напрямом розвитку науки та технологій на сучасному рівні є розробка, створення та впровадження мехатронних систем нового покоління.

На цей час розвиток виробничої та побутової техносфери й подальшого впровадження систем мехатронної автоматизації та роботизації у різні фізико-технічні процеси всіх сфер діяльності суспільства сприяють створенню інтелектуальних фізико-технічних виробів, систем і процесів, що володіють якісно новими функціями, властивостями та можливостями.

На базі технічних досягнень у сферах механіки, автоматики, електроніки та інформатики здійснюється структура створення електромехатронних систем, які впливають на роботу автоматизованого керування машинами та механізмами.

Головна концепція електромехатронних систем полягає в узгодженні принципів проектування фізично різнорідних компонент механічної та електричної системи. Спільне функціонування таких систем і їхніх підсистем дає змогу забезпечити необхідні параметри та характеристики машин і механізмів вже на ранніх стадіях проектування.

Такий підхід вимагає наявності розвиненої системи автоматизованого проектування та керування та складається з програмних модулів автоматизованого формування, дослідження математичних моделей динаміки як машин загалом, так і їхніх окремих функціональних частин.

На базі створених електромехатронних систем та підсистем розвиваються перспективні методи їх діагностування, що сприяють створенню сучасних автоматизованих конструкцій, які мають широкі можливості та взаємозаміну елементів.

Загалом, мехатроніка пов'язана з практикою та технічним прогресом, що обумовлено знаннями та вміннями фахівців і їхньою інженерною інтуїцією.

# 1 МЕХАТРОНІКА ТА ЇЇ СКЛАДОВІ ЕЛЕМЕНТИ

## 1.1 Головні поняття та історія розвитку мехатроніки

Стрімкий розвиток мехатроніки як нового науково-технічного напрямку обумовлений швидко зростаючим інтересом і високою активністю фахівців у науково-дослідній, освітній і виробничій сферах. Це визначає перспективу розвитку мехатроніки в ХХІ столітті як одного з ключових напрямів сучасної науки та техніки.

*Мехатроніка* – це галузь науки та техніки, яка заснована на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними й комп'ютерними компонентами. Такий склад забезпечує проектування та виробництво якісно нових механізмів, машин і систем з інтелектуальним керуванням і функціональними рухами [1, 2, 3].

Термін «мехатроніка» уперше введений старшим інженером компанії Yaskawa Electric японцем Тецуро Моріа (Tetsuro Moria) у 1969 році. Ця назва отримана комбінацією слів «МЕХАніка» і «елекТРОНІКА». Незважаючи на наявність стандартного визначення, «мехатроніка» залишається дещо суперечливим поняттям. Часто цей термін використовують у значенні «електромеханіка», що є суперечливим, але припустимим.

Принципи *синергетики* лежать в основі побудови мехатронних систем, а саме в поєднанні в одному агрегаті компонент різної технічної природи, які адаптивно взаємодіють із зовнішнім середовищем як єдиний функціональний і конструктивний організм.

Термін «синергетика» (інтеграція) був запропонований у 70-х роках ХХ століття німецьким фізиком Г. Хакеном і позначав спільну дію та співробітництво, що спрямовані на досягнення спільної мети. В цілому, синергетичне об'єднання передбачає не просте з'єднання окремих частин систем, а інтелектуальних досягнень шляхом об'єднання більш високих результатів.

Історія розвитку мехатроніки як науки почалась з розвитку окремих наук, на стиках яких виникають нові ідеї.

Наприклад, наука що виникла в стародавні часи, на зорі розвитку нашої цивілізації є «механіка». Перший трактат із механіки, що дійшов до наших часів, з'явився в Стародавній Греції у вигляді твору Арістотеля (384–322 рр. до н. е.). Далі наукові основи статички у механіці розробив Архімед (287–12 рр. до н. е.). Так із покоління в покоління на протязі багатьох століть розвивалась ця наука. Безцінний подальший внесок у розвиток механіки внесли Л. Ейлер, Ж. Л. Лагранж, К. Г. Я. Якобі,



М. В. Остроградський, М. Є. Жуковський, Г. Р. Герц, І. В. Мещерський, К. Е. Ціолковський та багато інших.

З розвитком людства вдосконалювались існуючі механізми та з'являлись нові. Вони стали невід'ємною частиною життя з моменту свого виникнення (рис. 1.1). Отже, у сучасному світі механіка трансформувалась у мехатроніку.



Рисунок 1.1 – Стародавні механічні та сучасні електромеханічні системи

Мехатроніці властиве прагнення до повної інтеграції механіки, електричних машин, силової електроніки, програмованих контролерів, мікропроцесорної техніки та програмного забезпечення.

Складники мехатроніки становлять об'єднання електромеханічних компонентів з силовою електронікою, керування якими здійснюється за допомогою різних мікроконтролерів, персональних комп'ютерів або інших обчислювальних пристроїв (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Сучасні мехатронні системи



Рисунок 1.3 – Діаграма взаємоперетину галузей науки та техніки

У цьому визначенні особливо підкреслена триєдина сутність мехатронних систем (далі – МС), в основу побудови яких покладено ідею глибокого взаємозв'язку механічних, електронних, комп'ютерних і інших елементів (рис. 1.3) [3].

Отже, поступово мехатроніка стає «наукою про все», яка застосовується в багатьох галузях і напрямках.

*Мета мехатроніки* складається зі створення інтелектуальних машин і технічних систем різного призначення з огляду на фізичні процеси, що відбуваються, і які призводять до створення якісно нових функцій, властивостей і характеристик.

*Предметом мехатроніки* є методи, процеси проектування та виробництва якісно нових модулів, комплексів і машин, а на їх основі – інтелектуальних дослідних і промислових самоврядних технічних систем.

*Метод мехатроніки* заснований на системному поєднанні відокремлених природничо-наукових і інженерних напрямків, таких як: точна механіка, електротехніка, мікроелектроніка, комп'ютерне керування та інформатика на всіх етапах життєвого циклу виробів, починаючи з маркетингу та проектування, і продовжуючи на етапах реалізації (виробництва), експлуатації та утилізації.

Методологічною основою розробки мехатронних систем слугують методи паралельного проектування (concurrent engineering methods). При традиційному проектуванні машин із комп'ютерним управлінням послідовно проводиться розробка механічної, електронної, сенсорної та комп'ютерної частин системи, а потім вибір інтерфейсних блоків [1,2,4].

У сучасних МС для забезпечення високої якості реалізації складних і точних рухів застосовуються методи інтелектуального управління (advanced intelligent control). Ця група методів спирається на нові ідеї в теорії управління, сучасні апаратні та програмні засоби обчислювальної техніки, перспективні підходи до синтезу керованих рухів МС.

Основою сучасних методів мехатроніки є синергетична інтеграція (об'єднання) структурних елементів, технологій, енергетичних та інформаційних потоків для досягнення єдиної мети.

Синергетична інтеграція елементів при проектуванні мехатронних виробів заснована на трьох базових принципах:

- реалізації виробів із мінімально можливою кількістю структурних і конструктивних елементів шляхом об'єднання їх (двох і більше) в єдині багатофункціональні модулі (блоки);
- вибору інтерфейсів (зв'язків між блоками) як локальних точок інтеграції та виключення надлишкових структурних блоків та інтерфейсів;

– перерозподілу функцій у мехатронній системі від апаратних блоків до інтелектуальних (комп’ютерних, інформаційних, програмних) компонентів.

Ступінь інтеграції мехатронної системи є однією з головних класифікаційних ознак у мехатроніці. Серед інших класифікаційних ознак розвитку мехатронних систем виокремлюються інтелектуалізація та мініатюризація.

Відповідно, мехатронні технології також базуються на комплексному застосуванні маркетингових, проектно-конструкторських, виробничих, технологічних, комп’ютерних та інформаційних методах і технологіях, які забезпечують повний життєвий цикл мехатронних виробів.

Метод мехатроніки й мехатронні технології носять універсальний характер і застосовані як до прикладних інженерних розробок, так і до розробки теоретичної бази побудови складних фізико-технічних систем.

Стрімкий розвиток мехатроніки у світі – це закономірний процес, який викликаний принципово новими вимогами ринку до показників якості технологічних машин і складним фізико-технічним системам і процесам.

У машинобудуванні метою та предметом мехатроніки є створення й виробництво якісно нових модулів руху та машин на їх основі, що необхідно для реалізації заданих функціональних дій машин і механізмів.

Функціональний рух мехатронної системи передбачає її цілеспрямований механічний рух (переміщення), яке координується з паралельно керованими технологічними та інформаційними процесами [3].

Великі можливості відкрилися перед мехатронікою внаслідок її зближення з мікросистемними технологіями (наприклад, мікроелектромеханічні, мікроробототехнічні тощо). Унаслідок цього сформувався самостійний напрям мехатроніки – *мікромехатроніка*.

Останніми роками намітилося проникнення мехатронних технологій у нанотехнології. Переважно це втілюється у створенні прецизійних пристроїв і приладів та наноструктур з унікальними властивостями (наприклад, тунельний мікроскоп, атомно-силовий мікроскоп, оптичний лазерний силовий мікроскоп, наноінженерні поверхні деталей тощо).

У цей час мехатроніка широко застосовується у таких сферах:

– електроенергетиці (у конструкціях машин і механізмів електроживлення та електроспоживання);

- транспортному машинобудуванні (залізничний та міський транспорт, нетрадиційні транспортні засоби, авіакосмічна техніка, загально-промислові механізми тощо);
- машинобудуванні (автоматизоване машинобудування, верстатобудування, електронне та енергетичне машинобудування тощо);
- робототехніці різного призначення;
- приладобудуванні (контрольно-вимірювальні пристрої та машини, офісна техніка, навігаційні прилади, обчислювальна техніка);
- мікроелектромеханічних системах (мікромашини, мікророботи тощо);
- нанотехнології (мікроскопи, зонди, машини з мікромеханічними обробками поверхонь деталей тощо);
- побутової техніки (автономні пилососи, швейні, пральні, посудомийні машини, холодильні установки);
- медичному та спортивному обладнанні (біоелектричні й екзоскелетні протези для інвалідів, тренажери, масажери, вібратори тощо);
- фото- й відеотехніки (пристрої фокусування відеокамер, програвачі відеодисків тощо);
- поліграфічних машинах;
- інтелектуальних атракціонах.

Цей список може бути розширений. Ринок мехатронної техніки динамічно розвивається та має стійку тенденцію до зростання.

Незважаючи на це, у мехатроніці ще не до кінця сформульовані класифікаційні ознаки через недавню появу цього наукового напрямку. На цей час мехатроніка є значною мірою долею практиків. Розробка теоретичних основ мехатроніки перебуває на початковій стадії. Їй ще далеко, наприклад, до такої аксіоматичної науки, як теоретична механіка. Мехатроніка, однак, належить до групи міждисциплінарних природничо-технічних напрямів навчання, а не до інженерної групи.

На цьому етапі найважливіше значення має виявлення сутності нових принципів побудови та тенденцій розвитку сучасних машин і механізмів. Робота їх спирається на нові ідеї у теорії управління, сучасні апаратні та програмні засоби обчислювальної техніки, перспективні підходи до синтезу керованих рухів МС.

## **1.2 Об'єкти та елементи мехатроніки в транспортних засобах**

Базовими об'єктами мехатронних і робото-технічних систем є мехатронні модулі й комплекси різного призначення, тому проектування

сучасних мехатронних систем базується на модульних принципах і технологіях.

До складу будь-якої машини входять: механічна та приводна частини (переважно електромеханічна) і система керування [1,5].

Елементи механічної частини:

- робочий орган (лебідка крана, робоче колесо насоса, фреза металорізального верстата тощо), що виконує корисну механічну роботу (переміщення вантажу, механічну обробку деталі тощо);
- механічна передача, яка змінює швидкість руху або його характер (поступальний замість обертального).

Головним елементом приводної частини є електропривод, який представляє собою автоматизовану електромеханічну систему, до складу якої входять електричні, механічні, електронні вузли.

Сучасний електропривод складається з електричного двигуна, електронного перетворювача електричної енергії та системи автоматичного керування. За допомогою електроприводів приводяться до руху механізми транспортних засобів, промислової та побутової техніки та інших. Різноманітні електроприводи споживають разом понад 60 % електричної енергії, що вироблена усіма електростанціями України.

Особливості сучасного електропривода [1,2,5]:

- широке використання напівпровідникових перетворювачів енергії для регулювання швидкості електроприводів;
- застосування мікропроцесорних контролерів для реалізації завдань керування електроприводами.

Приклад структури елементів електроприводу зображений на рисунку 1.4.

*Мережа електропостачання* є джерелом електричної енергії.

*Перетворювач електричної енергії* використовується для керування потоком електричної енергії, що поступає від мережі до двигуна.

Сучасні перетворювачі виготовляються на базі потужних напівпровідникових елементів. Найпоширенішими різновидами перетворювачів енергії є перетворювачі частоти та випрямлячі.

*Система автоматичного керування* входить до складу перетворювача енергії та має мікропроцесорну систему, яка керує процесом стабілізації швидкості двигуна.

*Двигун* – це є перетворювач електричної енергії в механічну.

*Редуктор* використовується для зміни параметрів механічної енергії (наприклад, зменшення швидкості та підвищення моменту або для перетворення обертального руху на прямолінійний).

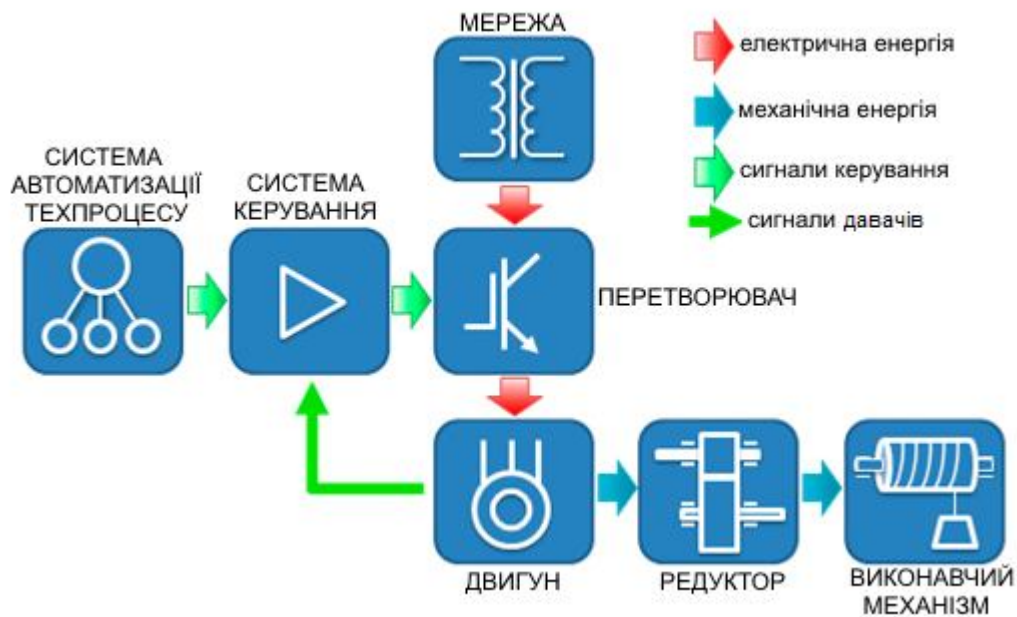


Рисунок 1.4 – Структура сучасного електропривода промислового механізму

*Виконавчий механізм* – пристрій, який безпосередньо виконує корисну роботу (рух транспорту, підйом вантажу, обертання вентилятора тощо).

У побудові машин нового покоління спостерігається тенденція передачі все більшої кількості функцій від механічних вузлів до інтелектуальних (електронних, комп'ютерних, інформаційних), із яких складаються модулі та системи керування машиною або механізмами.

### 1.3 Мехатронні модулі та системи

Мехатронні модулі все частіше застосовуються в різних транспортних системах. Наприклад, до цієї групи транспортних засобів належать електровелосипеди, ролери, інвалідні коляски, електромобілі з автономними джерелами живлення.

*Модуль* – це уніфікована функціональна частина машини (системи), конструктивно оформлена як самостійний виріб або підсистема.

*Мехатронний модуль* – це функціональний і конструктивно самостійний синергетичний, апаратно та програмно інтегрований виріб (або підсистема), що складається з елементів різного фізичного походження і призначений для реалізації певних функцій системи.

Модулі можуть складатися з окремих мехатронних елементів (компонентів). За характером функцій, що виконуються модулями та за

складом їхніх пристроїв і елементів, які входять до них умовно, вони поділяються на групи:

1. Виконавчі мехатронні модулі руху [3,4]:
  - модулі руху (далі – МД);
  - мехатронні модулі руху (далі – ММР);
  - інтелектуальні мехатронні модулі руху (далі – ІММР).
2. Вимірювально-інформаційні мехатронні модулі.
3. Мехатронні модулі систем керування різного рівня.

*Модуль руху* (МД) – конструктивно й функціонально самостійний виріб, що складається з механічної (гідравлічної, пневматичної) та електротехнічної частини, яке можна використовувати індивідуально та в деяких комбінаціях з іншими модулями. Прикладами МД є мотор-редуктори, мотор-колесо, мотор-барабан (рис. 1.5), електрошпинделі тощо.



Рисунок 1.5 – Модулі руху: мотор-колесо, мотор-барабан

*Мехатронний модуль руху* (ММР) – це конструктивно й функціонально самостійний виріб, що складається з механічної (гідравлічної, пневматичної) та електротехнічної частини, а також електронної та інформаційної частин. Такий модуль можна використовувати індивідуально й у деяких комбінаціях з іншими модулями.

На цей час існує реальна інтелектуалізація виконавчих мехатронних модулів руху на приводному рівні машин і механізмів.

*Інтелектуальний мехатронний модуль руху* (ІММР) становить конструктивний і функціонально самостійний виріб із синергетичною інтеграцією механічної (гідравлічної, пневматичної), електричної, електротехнічної, електронної та комп'ютерної (мікропроцесорної) частин. Їх можна використовувати індивідуально й у деяких комбінаціях з іншими модулями.

Очевидно, зазначені модулі мають додаткові частини, які відрізняють їх один від одного, але загалом їх об'єднує можливість



використання індивідуально або, в деяких комбінаціях, з іншими модулями.

Мехатронні модулі різного рівня наведені на рисунку 1.6.

*Інформаційно-вимірювальні* мехатронні модулі призначені для збору, обробки, передачі, зберігання та подання достовірної інформації у зручному для обчислювальної техніки вигляді та для реалізації керування мехатронними системами.

Мехатронні модулі систем керування призначені для управління складними динамічними об'єктами та припускають багаторівневу ієрархічну структуру. Вона включає стратегічний, тактичний і виконавчий рівні керування, які мають доступ до інформаційно-вимірювального мехатронного модуля. Використання такого складу структури сприяє вирішенню завдань керування на кожному ієрархічному рівні управління мехатронної системи.

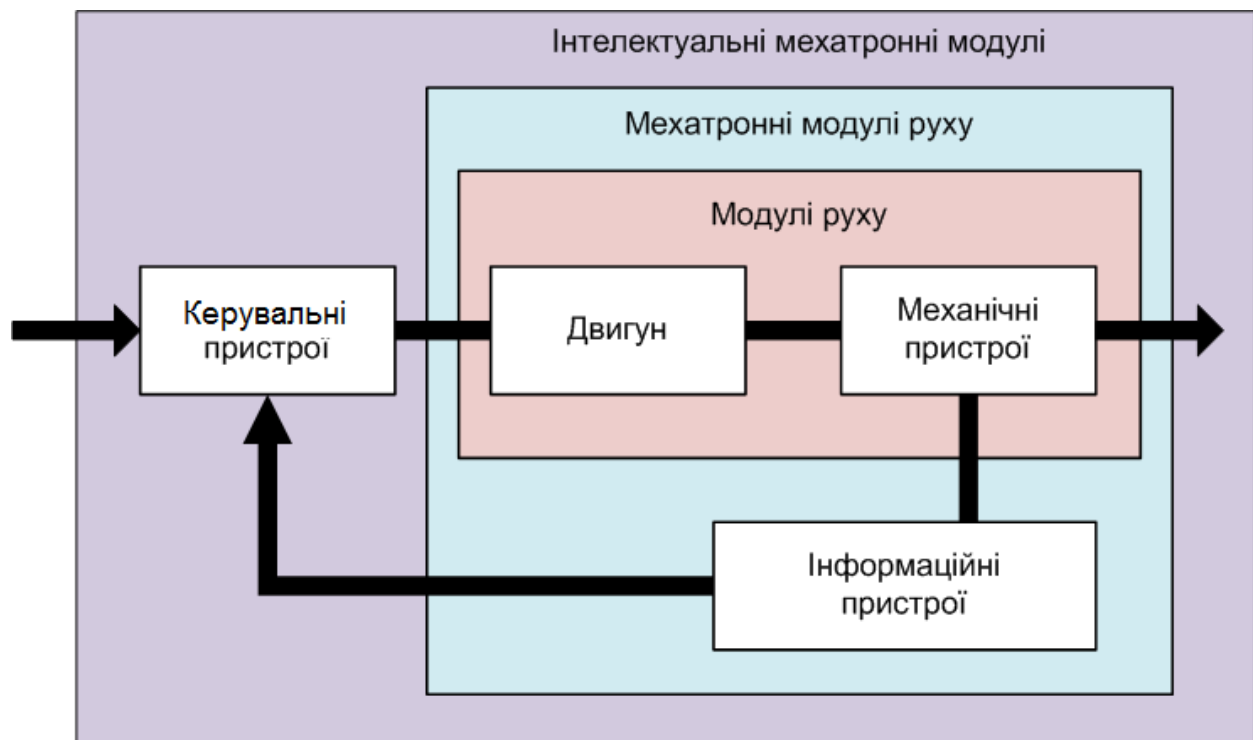


Рисунок 1.6 – Елементи інтелектуальних мехатронних модулів

Загалом, складність завдань керування мехатронними системами обумовлює доцільність і необхідність їх вирішення з залученням методів і технологій штучного інтелекту.

Практикується конструктивне вбудовування різнорідних мехатронних елементів у конструкцію мехатронних модулів.



У визначенні мехатронних систем також декларується необхідність інтелектуалізації мехатронних і робототехнічних систем насамперед шляхом застосування інтелектуальних систем керування [1,4].

Синтез ІММР і мехатронного модуля керування сприяє створенню інтелектуальної мехатронної машини.

*Інтелектуальна мехатронна машина (ІММ)* – це інтелектуальна багатовимірна система, побудована на мехатронних принципах і технологіях. Така система здатна ефективно виконувати програми функціональних рухів в умовах нечіткої та неповної інформації про експлуатаційну характеристику машини та параметри зовнішнього середовища.

Окремим випадком такої машини є інтелектуальна робототехнічна система. Узагальнена структура мехатронної машини, в основу побудови якої покладено структура автоматичних роботів, зображена на рисунку 1.7.

Зовнішнім середовищем для машин цього класу є технологічне середовище, яке містить основне й допоміжне обладнання, технологічне оснащення та об'єкти робіт.

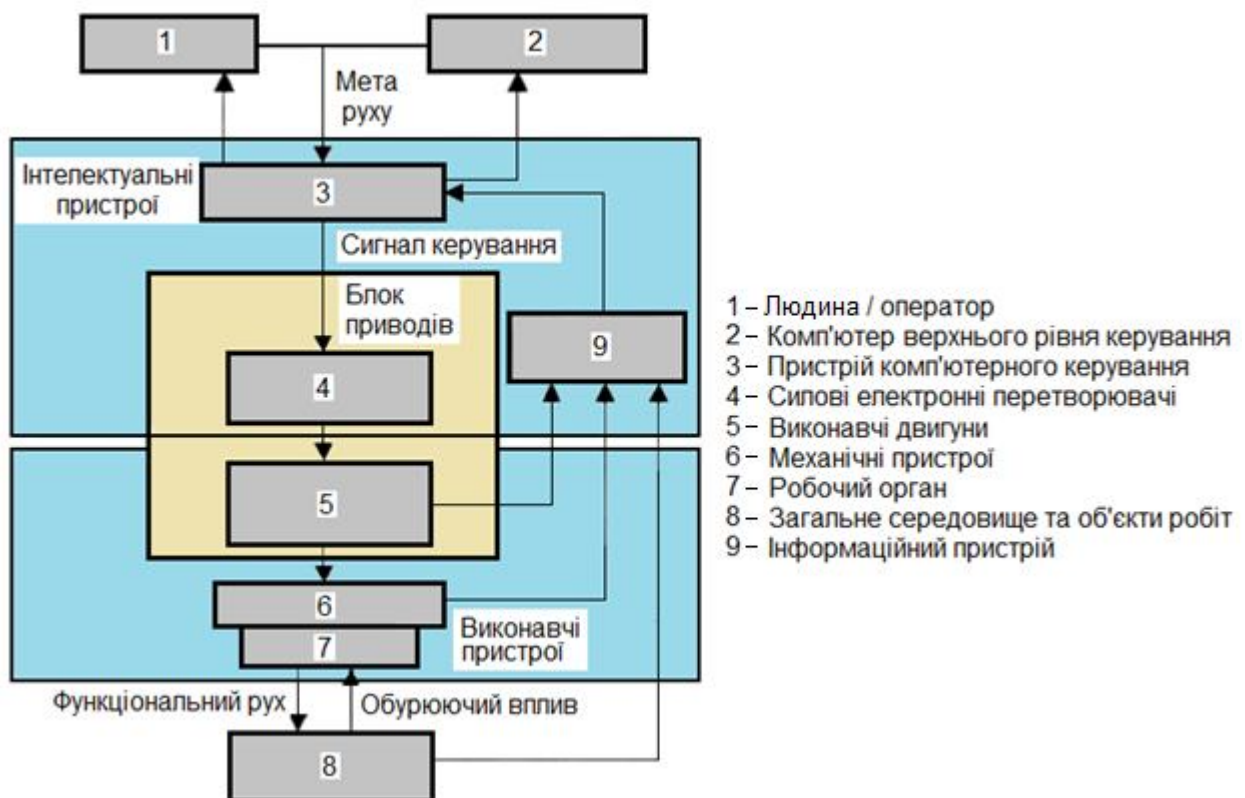


Рисунок 1.7 – Загальна структура мехатронних машин

Характеристики технологічних середовищ, зазвичай, можуть бути визначені за допомогою аналітико-експериментальних досліджень і методів комп'ютерного моделювання. Під час виконання мехатронною

системою заданого функціонального руху, об'єкти робіт впливають на робочий орган. Наприклад, вплив сили різання на технологічну операцію механічної обробки, вплив реакції струменя рідини при гідравлічному різанні та інші.

До складу мехатронної машини входять чотири частини:

- механічний пристрій, кінцевою ланкою якого є робочий орган;
- блок приводів, що складається з силових перетворювачів і виконавчих двигунів;
- пристрій комп'ютерного керування, на вхід якого надходять команди людини-оператора або ЕОМ верхнього рівня керування;
- інформаційний пристрій, призначений для отримання й передачі до пристрою комп'ютерного керування даних про реальний рух машини та про фактичний стан його підсистем.

Механічний пристрій і двигуни об'єднані в групу виконавчих пристроїв. До складу групи інтелектуальних пристроїв включені електронна, керувальна та інформаційна частини машини.

Механічний пристрій мехатронної машини є багатоланковим механізмом. Кінематичний ланцюг його утворюють рухомі ланки, складові кінематичні пари. Кінцевою ланкою кінематичного ланцюга є робочий орган.

*Робочий орган* мехатронної машини – це складник механічного пристрою для безпосереднього виконання технологічних операцій та/або допоміжних переходів.

Прикладами робочих органів в робототехніці є такі пристрої: механічні, вакуумні й електромагнітні захватні, а також зварювальні кліщі (для точкового зварювання), інструментальні головки для механічної обробки й лазерних операцій, фарбувальний пістолет тощо (рис. 1.8).

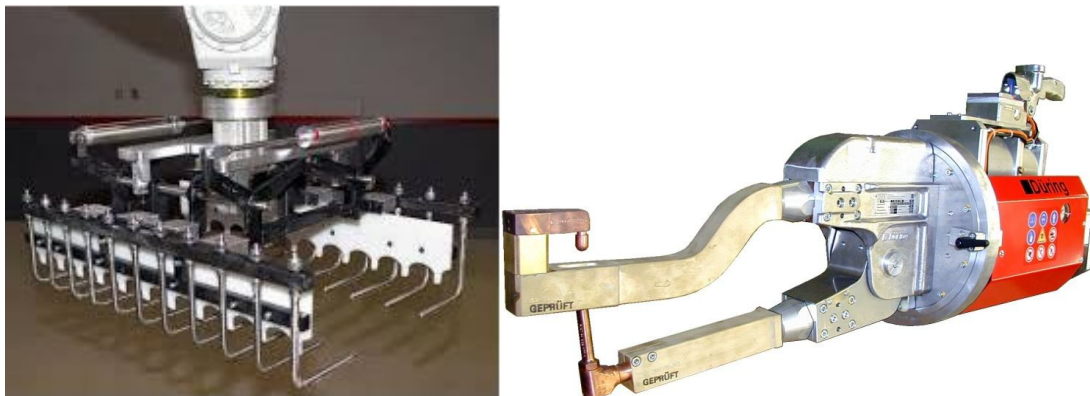


Рисунок 1.8 – Приклади робочих органів:  
захватні пристрої, зварювальні кліщі

Отже, робочий орган – це керований модуль, який може мати декілька ступенів рухливості та складатися з декількох елементів. Тому при його розробці також можуть використовуватися мехатронні принципи інтеграції.

Пристроєм комп'ютерного керування є комплекс апаратних і програмних засобів, що виробляє сигнали керування для блоку приводів машини. До складу комплексу входять задавальні пристрої (наприклад, джойстики та рукоятки), пульт керування оператора, обчислювальні та перетворювальні пристрої, периферійні пристрої введення-виведення інформації.

Пристрій комп'ютерного керування виконує такі основні функції:

- керування функціональними рухами мехатронної машини у реальному масштабі часу;
- координації керування механічним рухом із супутніми зовнішніми процесами;
- взаємодії з людиною-оператором через людино-машинний інтерфейс у режимах програмування та безпосередньо у процесі руху (режим on-line);
- обміну даними із зовнішніми пристроями (інформаційним пристроєм, блоком приводів, комп'ютером верхнього рівня, периферійними пристроями).

Інформаційний пристрій призначений для збору й передачі в пристрій керування інформації про фактичний стан зовнішнього середовища й руху мехатронної машини.

Згідно з наведеною блок-схемою (див. рис. 1.7) в інформаційному пристрої можна виокремити три групи сенсорів:

- давачі інформації про стан зовнішнього середовища й об'єктів робіт (системи технічного зору, локаційні давачі, далекоміри тощо;
- давачі інформації про рух механічної частини (давачі переміщень, швидкостей, прискорень, сил і моментів);
- давачі зворотного зв'язку блоку приводів (надають інформацію про поточні значення електричних струмів і напруг у силових перетворювачах).

Система інтелектуального управління машиною (комплекс верхнього рівня управління) в умовах неповної інформації зазвичай реалізується у вигляді комплексу програмних засобів на комп'ютері верхнього рівня керування.

За відсутності такого комплексу ІММ перетворюється в ІММР.

Сучасні інтелектуальні модулі (рис. 1.9), вузли та системи легко перепрограмуються під нове завдання, що розширює функціональні можливості машин і механізмів.



Рисунок 1.9 – Мехатронні модулі з інтегрованим робочим органом

Водночас із розвитком техніки вузли машини різного фізичного походження (механічні, електричні, електромеханічні, електронні, інформаційні) поступово об'єднуються в єдине конструктивне ціле. Саме такі інтелектуальні машини та вузли називають мехатронними.

#### **1.4 Структурні базиси мехатроніки**

Цілісність мехатронного об'єкта та технологічні процеси можна подати у вигляді структурних пірамід мехатроніки, які враховують і складаються з трьох частин: механічної, електронної та інформаційної [1–4]. Розвиток мехатронних систем та технологічних процесів розглядаються на принципах моделей, що зображені на рисунку 1.10.

На рисунку 1.10, *а* осі координат піраміди відповідають базовим напрямам механіки, електроніки, інформатики. На координатних осях відзначені сучасні рівні розвитку частин напрямів: прецизійна механіка, мікроелектроніка, інформаційні технології.

Попарно інтеграція базових напрямів (грані піраміди) утворює три гібридних напрями, до яких належать: електромеханіка, комп'ютерні системи керування, системи автоматизованого проектування механічних систем. На стику гібридних напрямів виникає мехатроніка.

Базові та гібридні напрями визначають технологічний базис мехатроніки (рис. 1.10, *б*).

Пірамідальна форма та склад технологічної піраміди мехатроніки повністю відповідає її структурному базису.

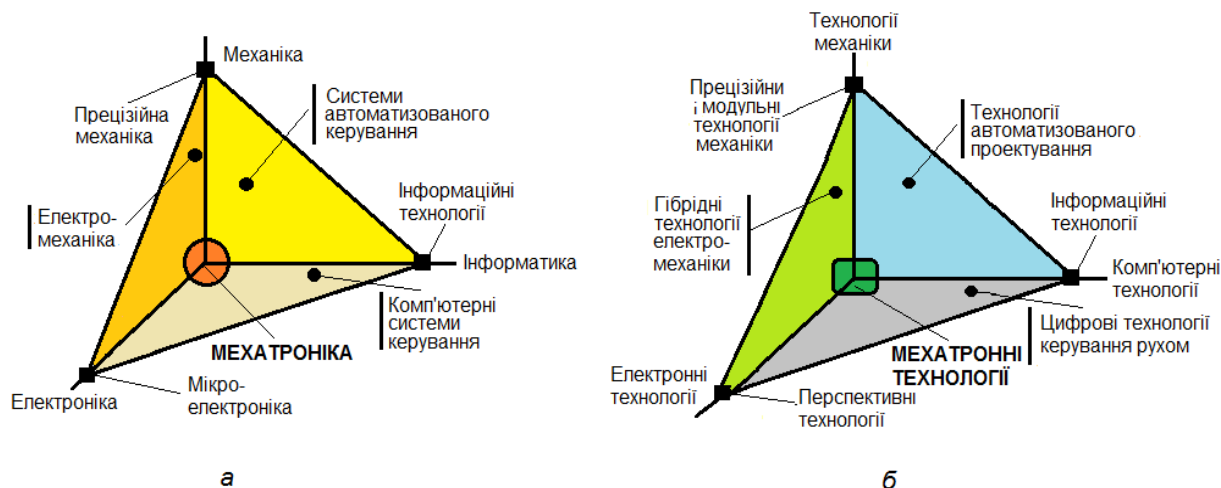


Рисунок 1.10 – Структурна (а) і технологічна (б) піраміди мехатроніки

Фундаментом технологічного базису мехатроніки є нові технології всіх базових напрямів: прецизійні та модульні технології механіки, мікроелектронні та інформаційні технології.

Усі компоненти мехатронних модулів поділяються на групи, що визначаються елементами:

- виконавчі елементи, до яких належать механічні та електротехнічні елементи (двигуни, перетворювачі руху, напрямні, гальма тощо);
- інтелектуальні елементи, до яких належать силові електронні блоки, інформаційні та керувальні елементи.

Розвиток науково-технічного прогресу ХХ століття привів до головних етапів механізації та автоматизації виробничих процесів, унаслідок яких також з'явився термін «мехатроніка» [1–3].

*Механізація* – заміна ручних знарядь праці машинами й механізмами із застосуванням для їхньої дії різних видів енергії в процесі трудової діяльності [2].

*Автоматизація* – застосування технічних засобів економіко-математичних методів і систем керування, які частково або повністю звільняють людину від безпосередньої участі в процесах отримання, перетворення, передачі та використання енергії, матеріалів або інформації [5].

Складником автоматизації є *автоматика* – галузь теоретичних і прикладних знань про автоматично функціонуючі пристрої та системи.

До поняття автоматизації також належить технічна кібернетика, яка створена на теорії оптимізації використання технічних засобів автоматичного керування та автоматичного регулювання. Такі системи керують пристроями обчислювальних машин, пристроями на базі мікропроцесорної техніки, вимірювальними перетворювачами,

виконавчими механізмами, регуляторами технологічних процесів, пристроями реєстрації та відображення інформації, тощо) [5].

Унаслідок створення автоматизованих систем взагалі складаються функціональні схеми мехатронних систем. Наприклад, на рисунку 1.11 показана функціональна схема мехатронної системи, яка має три підсистеми: інформаційну, енергоелектронну та електромеханічну [6].

Інформаційна підсистема містить систему керування та діагностики (далі – СКД) і блок сенсорних пристроїв (далі – СП).

Енергоелектронна підсистема складається з силових напівпровідникових перетворювачів (далі – СНП) та вторинного джерела живлення (далі – ВДЖ).

Електромеханічна підсистема містить об’єкт керування (далі – ОК), зазвичай виконаний у вигляді привода, та електромеханічний перетворювач (далі – ЕМП).

Серед особливостей таких мехатронних систем виокремлюють:

- можливість зміни параметрів в ОК;
- створення математичних моделей на основі методів ідентифікації.

Функціональні дії ЕМП є конструктивною ланкою об’єкта керування, що має оригінальне конструктивне виконання. Керування потоком енергії від ВДЖ до ЕМП здійснюється СНП. Об’єднання ВДЖ, СНП і ЕМП створюють мехатронну енергетичну підсистему (далі – МЕП), яка має нові властивості, що відсутні в окремо взятих блоках.

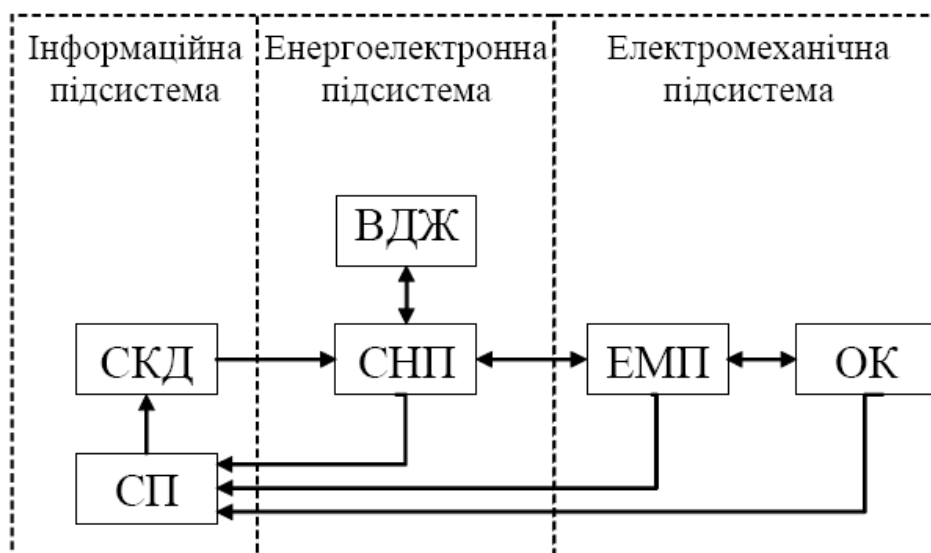


Рисунок 1.11 – Функціональна схема мехатронної системи

Мехатронна енергетична підсистема зазвичай є нелінійною, імпульсною підсистемою з параметрами, що змінюються дискретно. Завдяки цьому її аналіз, а також синтез системи керування потребує застосування методів, що базуються на сучасних комп'ютерних технологіях.

Розрахунок та проектування мехатронної системи складається з:

- із побудови спільної моделі цифрової, імпульсної та аналогової частин;
- дослідження статичних та динамічних характеристик системи, а також аналогової та імпульсної частин регулятора.

Приклад функціональної схеми (див. рис. 1.11) проілюстрував, що головним принципом керування мехатронних систем є принцип зворотного зв'язку, який дає змогу здійснювати контроль якості регулювання за відхиленням керованого параметра від заданого.

### **1.5 Прилади та засоби діагностування електромехатронних модулів і систем**

Прилади для діагностування електричних систем, поділяються на прилади, що вимірюють електричні та неелектричні величини (параметри).

*Електричні вимірювання* – виконують контактним (гальванічним) або безконтактним засобом із використанням перетворювачів електромагнітної енергії та електричних вимірювальних приладів (вольтметрів, амперметрів, частотомірів, осцилографів, омметрів).

*Електричні вимірювання неелектричних величин* – виконують за допомогою перетворювачів неелектричної величини (впливу) до електричної (сигналу, параметра).

*Неелектричні вимірювання* – виконують за допомогою вимірювального інструмента та вимірювальних пристроїв безпосередньої оцінки (щупи, динамометри, термометри, манометри, ареометри).

Неелектричні (механічні, гідравлічні, пневматичні, оптичні) пристрої та системи діагностуються за допомогою електричних вимірювальних систем з використанням давачів неелектричних величин.

Засоби діагностики будь-якої технічної системи розрізняють за загальними класифікаційними ознаками: призначенням, категорією, структурою, функціональним наповненням, конструкційними атрибутами [3,6].

Функціональне призначення та категорія діагностичного засобу, комплексно характеризують конструкцію або композицію та прив'язку



засобу до об'єкта діагностики. Стосовно мехатронних систем розрізняють декілька категорій діагностичного засобу, які підпорядковані у певний засіб.

*Електричний діагностичний прилад* – засіб діагностики, у якому вимірювання та реєстрація (індикація) діагностичного параметра (електричного або неелектричного) реалізується електричним способом (контактним або безконтактним).

*Неелектричний діагностичний прилад* – засіб діагностики, у якому вимірювання та реєстрація (індикація) неелектричного діагностичного параметра реалізується неелектричним способом за допомогою неелектричних приладів безпосередньої оцінки.

*Діагностичний пристрій* – засіб діагностики, який входить до складу діагностичного приладу (стенда, комплексу), виконує певні функції перетворення, але не має операторської периферії (органів керування та індикаторів).

*Діагностичне обладнання* – засоби діагностики, які встановлюються на борту транспортного засобу або інтегровані в його агрегати чи системи (входить до складу транспортного засобу).

*Діагностичне устаткування* – засоби діагностики, які використовуються за межами борту транспортного засобу (не входить до складу транспортного засобу).

*Діагностична установка* – засіб діагностики, за допомогою якого активізується (стимулюється) об'єкт діагностики з метою проведення перевірок.

*Діагностичний стенд* – стаціонарне конструктивне та функціональне поєднання діагностичної установки й діагностичних приладів.

*Діагностична система* – засіб діагностики, у якому реалізоване поєднання діагностичного обладнання та обладнання на функціональному (програмному) та апаратному рівні.

*Діагностичний комплекс* – функціонально пов'язане діагностичне устаткування, до складу якого входять діагностичні стенди та прилади різного призначення (діагностичні пости, лінії).

На етапі розробки конструкції засобу діагностики обраної категорії визначають та узгоджують конструкційні атрибути майбутнього виробу.

Приклад використання засобів діагностики модульних систем автомобілю зображений на рисунку 1.12. При цьому визначається прив'язка до борту автомобіля, мобільність, тип індикації, тип живлення або обирається конструктивний прототип (аналог, попередньої модифікації або базовий зразок) [3,6].



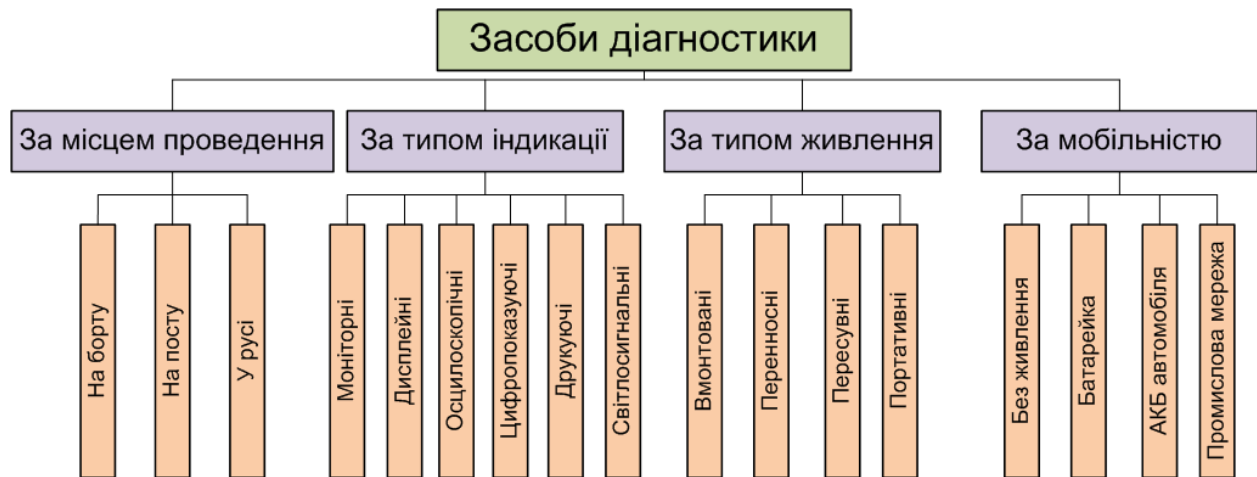


Рисунок 1.12 – Конструкційні атрибути засобів діагностики

Синтез конструкції та схемного рішення засобу діагностики починають із вибору типу живлення, класу мобільності та виду індикації з огляду на умови (місце) проведення діагностичних операцій.

Відмінною рисою сучасних діагностичних приладів є їхня мікропроцесорна будова, що дає змогу використовувати дисплейні засоби індикації в структурі приладу або універсальні засоби комп'ютерної техніки (монітор, клавіатуру, принтер) як периферійне оточення приладу.

Автономність таких приладів діагностики надає унікальну можливість використовувати їх під час діагностування систем при різних умовах.

### Контрольні питання

1. Дати поняття мехатроніки.
2. Що визначає термін «синергетика» і що для неї є характерним?
3. Перелічити головні компоненти мехатронних систем.
4. У чому полягає мета мехатроніки?
5. Що є предметом мехатроніки?
6. На чому засновані методи мехатроніки?
7. Проаналізувати діаграму взаємоперетину різних галузей науки та техніки, на основі яких формується мехатроніка.
8. У яких сферах на сьогодні використовуються мехатронні системи?
9. Що становить мехатронний модуль?
10. Особливості мехатронного модуля руху. Навести приклади.

11. Проаналізувати особливості інтелектуального мехатронного модуля руху.

12. З якою метою використовуються інформаційно-вимірювальні мехатронні модулі?

13. Що становить інтелектуальна мехатронна машина?

14. Які елементи входять до інтелектуальної мехатронної машини?

15. Що становить робочий орган мехатронної машини?

16. Проаналізувати структурну та технологічну схеми піраміди мехатроніки. Навести приклади.

17. Роль і місце мехатронних систем у роботі транспортних засобів.

## 2 ПРИНЦИПИ Й РІВНІ РОЗВИТКУ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ

### 2.1 Принципи будови мехатронних систем

Загальні тенденції розвитку техніки й особливостей мехатроніки, а також робототехніки безпосередньо визначають головні принципи, які мають системний підхід відповідно до закону ступеня  $3/2$ , поетапну мініатюризацію, уніфікацію, інтеграцію, інтелектуалізацію.

З огляду на розвиток мехатронних систем та робототехніки визначені деякі загальні принципи, на яких побудована їх робота [1–4].

*Перший принцип* – системне проектування (тобто синтез виробів мехатроніки) на основі загальносистемних критеріїв без декомпозиції на окремі функціональні компоненти. Реалізація цього принципу стала можливою тільки на певному етапі розвитку науки та на шляху його подальшого вдосконалення. При цьому існує ще багато проблем у частині формування загальносистемних критеріїв і розробки методів синтезу на їх основі.

*Другий принцип* – поетапна мініатюризація елементів шляхом послідовного освоєння різного порядку розмірностей виробів у вигляді окремих поколінь техніки. Кожне таке покоління вимагає нових відповідних технологій. При цьому для реалізації ідей необхідне технологічне обладнання, що базується на техніці попередньої розмірності.

Наприклад, реалізація цього принципу у мікромехатроніці передбачає розвиток 3D мехатронних і мікросистемних технологій на основі 2D технологій мікроелектроніки. Розвиток нанотехнологій, зі свого боку, передбачає використання мікротехніки (наприклад, мікроманіпуляторів тощо).

*Третій принцип* – уніфікація функціональних компонентів. У ході мініатюризації для систем до дециметрової розмірності цей принцип реалізується у вигляді модульної побудови систем із типу розмірних рядів. Вони мають конструктивно уніфіковані функціональні компоненти (рис. 2.1), такі як: енергоживлення, сенсорні, інформаційно-керувальні, виконавчі (приводні).

З огляду на головні вимоги до компонентів їх можна об'єднати в дві групи: інформаційні і силові.

Зі зменшенням габаритних розмірів елементів виробів до рівня сантиметрової розмірності загальносистемна оптимізація призводить до взаємного проникнення (конвергенції) цих функціональних компонентів.

Це дає зниження вагогабаритних параметрів, підвищення швидкодії та надійності (насамперед шляхом зменшення міжкомпонентних зв'язків).

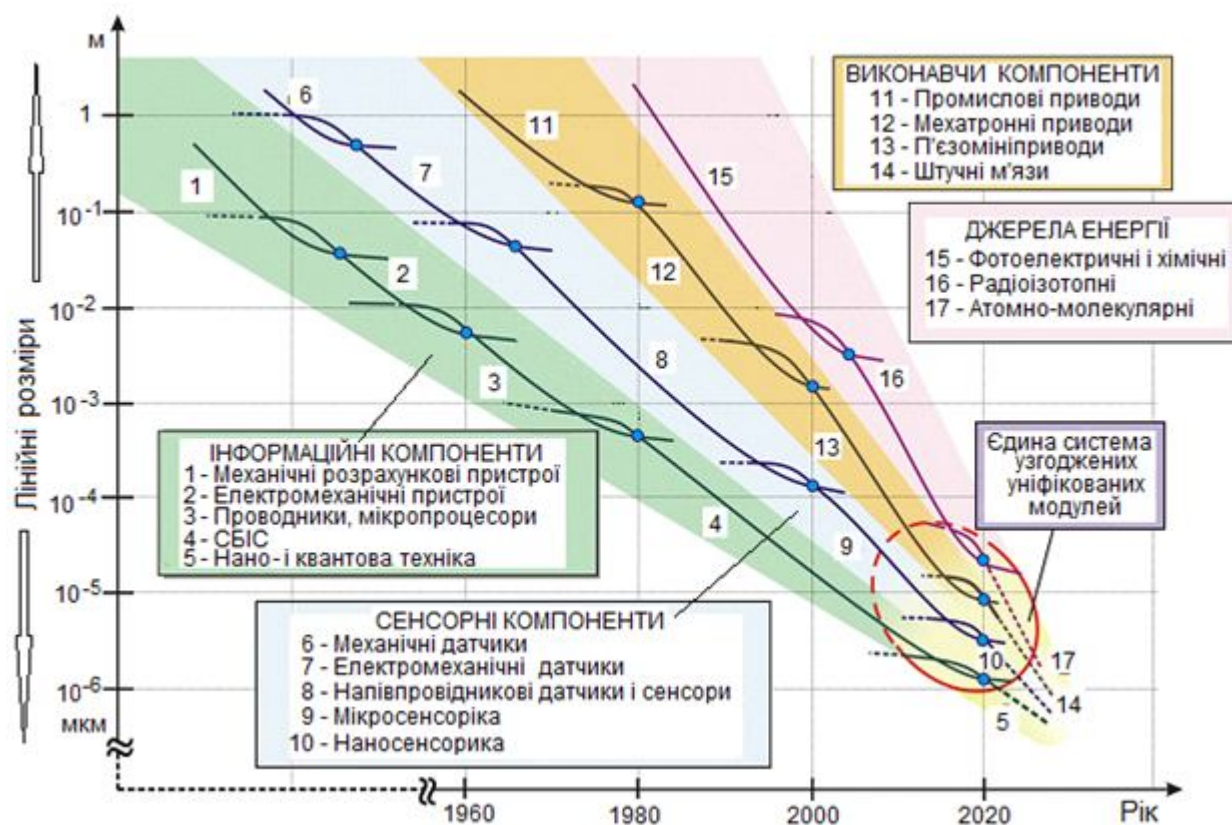


Рисунок 2.1 – Розвиток компонентів і елементної бази мехатроніки

Першим освоєним етапом процесу є поширення методів штучного інтелекту з інформаційно-керувальними компонентами, які впливають на інші функціональні компоненти від сенсорних до виконавчих.

Аналогічна тенденція існує в енергоживленні й енергоспоживанні шляхом його децентралізації та введенням вторинних джерел енергії в окремі функціональні компоненти. В основі цих процесів, як і раніше, лежить загальносистемна оптимізація.

*Четвертий принцип* – це інтеграція функцій на базі однорідних структур. Принцип побудови систем приходить на зміну модульному при переході до міліметрової розмірності. Цьому передують зазначене вище поступове взаємне проникнення функціональних компонентів, яке й завершується переходом до якісно нового типу. Такий перехід містить два етапи.

Перший етап охоплює інформаційні компоненти (сенсорні, інформаційно-керувальні, зв'язку), а другий – силові (виконавчі, енергоживлення).

На цей час перший етап реалізується на основі нейроподібних структур. Кожна функція виконується окремими ділянками таких структур

із можливістю їх оперативного перерозподілу та зміни меж. Така організація подібна багатоагентній системі в комп'ютерних мережах. Окремі компоненти втрачають свою конструктивну самостійність і перетворюються в програмний продукт, а саме в програмні агенти-модулі, що функціонують в однорідному матеріальному середовищі.

Другий етап освоєння однорідних структур – це реалізація цього принципу в силових функціональних компонентах. Це завдання вимагає пошуку нових фізичних принципів і шляхів їх технічної реалізації. Дослідження ведуться зі створення приводів за типом «штучних м'язів». Вони складаються з сотень елементарних мікроактуаторів на основі електроактивних полімерів і мають джерела енергоживлення (нанобатареї або нанопаливні елементи). Це сприяє поліпшенню вагогабаритних параметрів приводів і дозволяє кардинально підвищити надійність їхніх компонентів і модулів загалом.

*П'ятий принцип* – інтелектуалізація, як окремих функціональних компонентів, так і загальносистемних функцій. Подальшим розвитком цього принципу буде технічне освоєння творчих (креативних) здібностей людини.

*Шостий принцип* – це так званий закон ступеня  $3/2$ . Він належить до мініатюризації та полягає в тому, що завдяки різному порядку розмірностей обсягу (3) і поверхні (2) об'єктів при їх мініатюризації відбувається збільшення значущості поверхневих явищ. Наприклад, теплообміну із зовнішнім середовищем порівняно з об'ємними явищами (інерцією тощо). У результаті відповідно підлягають перегляду принципи побудови, методи розрахунку та проектування мехатронних систем у процесі їх мініатюризації.

## **2.2 Структура побудови та рівні інтеграції електромехатронних систем**

*Мехатронні пристрої* – це клас машин або вузлів, що базується на використанні досягнень точної механіки, електроприводу, електроніки, комп'ютерного керування. Усі ці елементи можна зустріти у величезній кількості традиційної техніки.

Мехатронні пристрої загально визначаються за низкою ознак:

1. Наявність інтеграції таких функціональних елементів:

- вихідної механічної ланки (далі – ВМЛ), яка виконує зовнішні функції мехатронного пристрою;
- двигуна вихідної ланки з механізмом передачі руху до ВМЛ;

- підсилювача-перетворювача енергії живлення двигуна (далі – ППЕЖ);
- пристрою цифрового програмного керування приводом;
- інформаційної системи, яка контролює стан зовнішнього середовища та внутрішніх параметрів мехатронного пристрою.

2. Мінімум перетворень інформації та енергії (наприклад, пряме цифрове керування безредукторним приводом).

3. Використання одного й того самого елемента мехатронного пристрою для реалізації декількох функцій (наприклад, параметри двигуна: струм, протидія ЕРС), що використовуються для вимірювання його моменту та швидкості (принцип поєднання функцій).

4. Проектування функцій різних елементів мехатронного пристрою у такий спосіб, щоб мета службового призначення виробу досягалася шляхом спільного виконання цих функцій без їх дублювання та з максимальним ефектом (принцип синергетики).

5. Об'єднання корпусів вузлів мехатронного пристрою (принцип поєднання корпусів).

Пристрій комп'ютерного керування здійснює такі функції:

- керування процесом механічного руху мехатронного модуля або багатовимірної системи у реальному часі з обробкою сенсорної інформації;
- організації керування функціональними рухами мехатронної системи, яка передбачає координацію керування її механічним рухом і супутніми зовнішніми процесами. Зазвичай, для реалізації функції керування зовнішніми процесами використовуються дискретні входи/виходи пристрою;
- взаємодії з системою «людина – оператор» через машинний інтерфейс у режимах автономного програмування (режим off-line) і безпосередньо у процесі руху мехатронної системи (режим on-line);
- організації обміну даними з периферійними пристроями, сенсорами й іншими пристроями системи.

Якісно нові властивості мехатронних модулів, порівняно з традиційними приводами, досягаються шляхом синергетичної інтеграції складових елементів.

Синергетична інтеграція – це не просто з'єднання окремих частин у систему за допомогою інтерфейсних блоків, а побудова єдиного приводного модуля через конструктивне об'єднання й навіть взаємопроникнення елементів, які мають, зазвичай, різне фізичне походження.

Призначення мехатронних модулів є реалізація заданого керованого руху, як правило, однією керованою координатою.

Мехатронні модулі руху є тими функціональними «кубиками», із яких потім можна компонувати складні багатокоординатні мехатронні системи.

Сутність мехатронного підходу до проектування полягає в об'єднанні в єдиний приводний модуль складників (рис. 2.2).

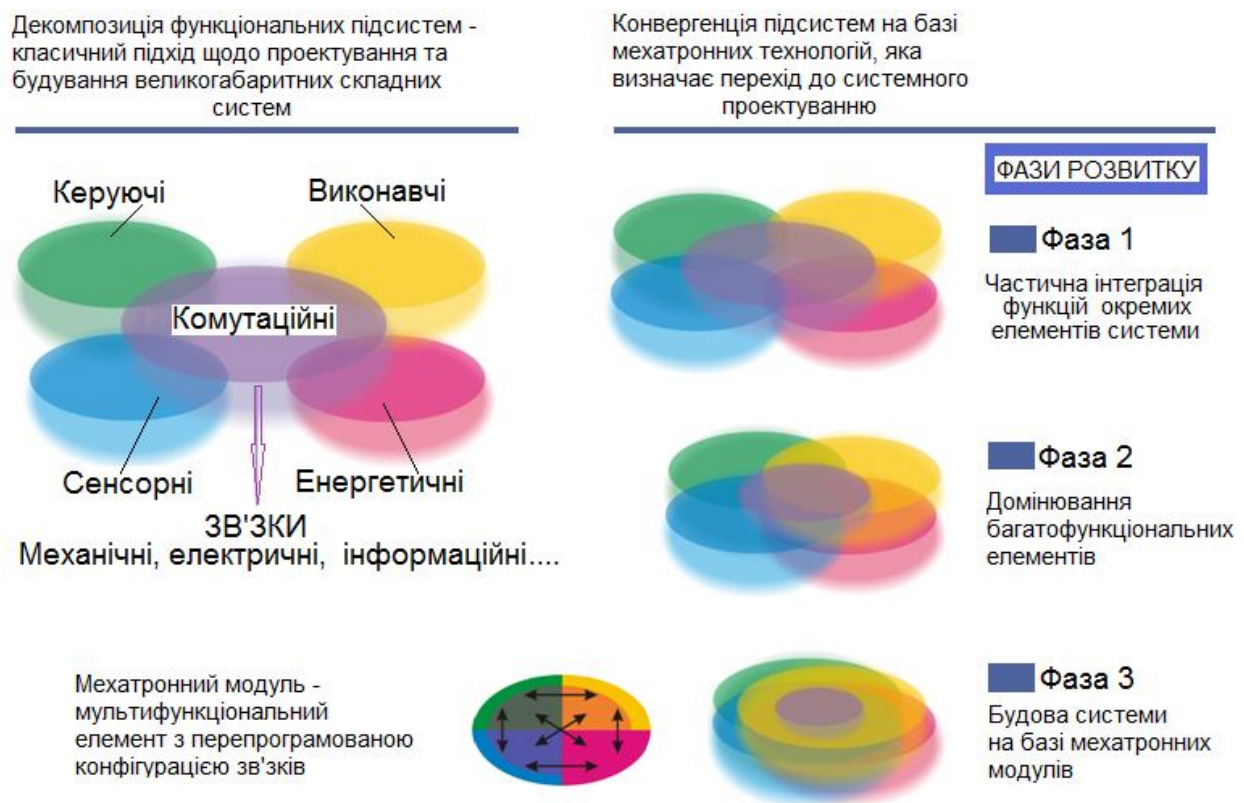


Рисунок 2.2 – Підходи проектування та методології побудови складних технічних систем

Застосування мехатронного підходу до проектування модуля руху базується на визначенні можливих точок інтеграції елементів у структурі приводу. На такій основі та з урахуванням техніко-економічного й технологічного аналізу необхідно приймати конкретні інженерні рішення на проектування та виготовлення модуля руху.

Наприклад, на вхід мехатронного модуля надходить інформація про мету руху, яка формується верхнім рівнем системи керування. Виходом є цілеспрямований мехатронний рух кінцевої ланки (переміщення вихідного валу модуля).

Отже, для фізичної реалізації електромеханічного мехатронного модуля теоретично необхідні чотири функціональних блоки, які

послідовно з'єднані. Наприклад, інформаційно-електричний і електромеханічний, функціональний перетворювач у прямому ланцюзі і електроінформаційний та механіко інформаційні перетворювачі в колі зворотного зв'язку.

## 2.3 Структура діагностичних систем

Побудова діагностичного прогнозу, розвиток транспорту, машинобудування тощо, а також вибір основних тенденцій та стратегій концентрується на такому:

- інтеграції технологій і знань;
- інтелектуалізації виробничих технологій;
- мехатронних технологіях машин і роботів;
- наскрізних інформаційних системах.

Системний підхід диктує нові вимоги щодо вбудованих механічних і гібридних компонентів, визначення їхніх параметрів та характеристик. Це, зі свого боку, веде до розвитку нових технологій і конструкторських рішень у сфері енергетики та механіки.

Розрізняють системи тестового й функціонального діагностування.

У системах тестового діагностування на об'єкт подаються спеціально організовані *тестові впливи* від засобів діагностування. У цьому разі зазвичай об'єкт діагностики не використовується за головним призначенням, а працює тільки для завдань діагностики.

У системах функціонального діагностування на об'єкт надходять *робочі впливи*, які передбачені його алгоритмом функціонування за призначенням.

У системах обох видів, обладнання діагностування сприймає та аналізує *відгуки* об'єкта на входні (тестові або робочі) впливи (*стимули*) й видає результат діагностування.

Отже, діагностична система складається з активізуальної (діагностичної установки) та вимірювальної (діагностичного приладу) частин.

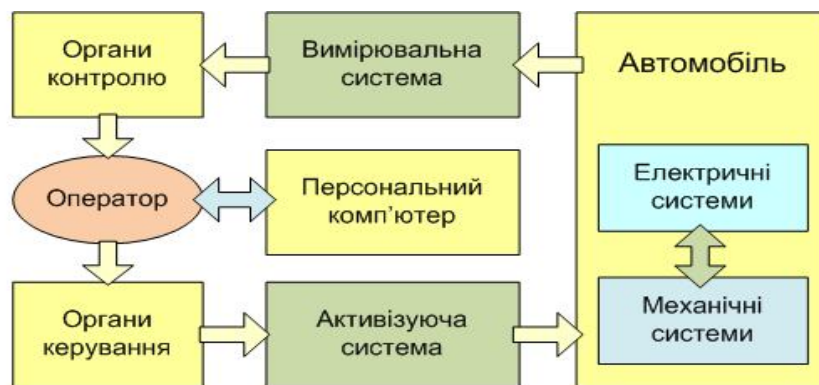
Діагностичні системи залежно від рівня керованості можуть бути виконані як неавтоматичні, *автоматизовані* (керування процесом) або *автоматичні* (керування системою). Для реалізації автоматизованого чи автоматичного процесу діагностування зазвичай використовують комп'ютеризовані або комп'ютерні діагностичні системи [5–7].

*Некомп'ютерна діагностична система* не виключає застосування персонального комп'ютера оператором із метою отримання довідкової

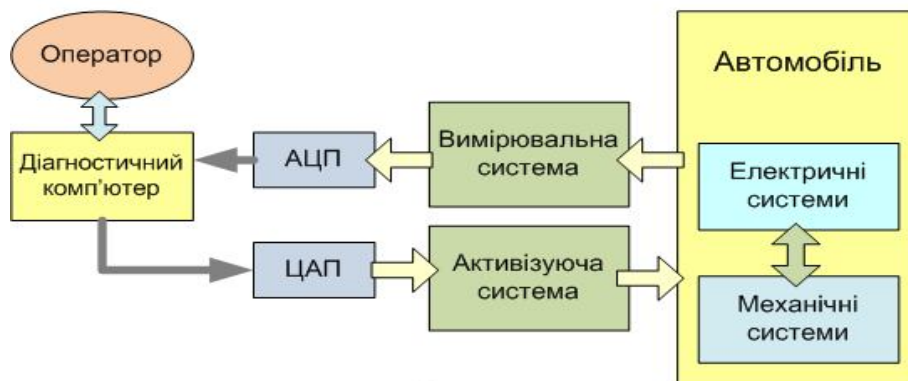


діагностичної інформації про об'єкт діагностики, а також занесення та обробки результатів діагностування. При цьому персональний комп'ютер не має безпосереднього інформаційного зв'язку з засобами та об'єктами діагностики, наприклад, автомобільної системи (рис. 2.3, а).

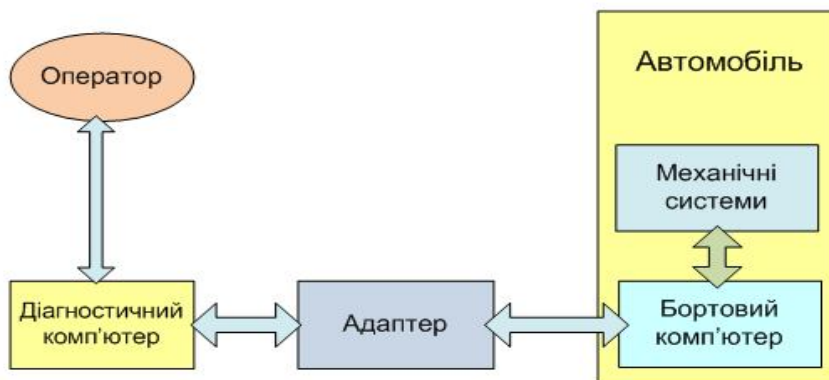
*Комп'ютеризована діагностична система* передбачає застосування у своєму складі комп'ютерних засобів для отримання інформації про технічний стан об'єкта діагностики. У таких системах програмно-апаратні засоби системи (давачі, актуатори, перетворювачі сигналів, комп'ютери) цілком розташовані за межами мехатронної системи.



а



б



в

Рисунок 2.3 – Узагальнені структури діагностичних систем:  
а – некомп'ютерної; б – комп'ютеризованої; в – комп'ютерної

Загалом, комп'ютеризована система створюється на базі звичайної електромеханічної діагностичної системи шляхом її комп'ютеризації та цілком підпадає під категорію «діагностичне устаткування» (рис. 2.3, б).

Для узгодження цифрових сигналів діагностичного комп'ютера з електромеханічними перетворювачами діагностичної установки використовуються цифроаналогові перетворювачі (далі – ЦАП).

Для вимірювання аналогових сигналів електричних приладів вимірювальної частини системи діагностичним комп'ютером застосовуються аналогово-цифрові перетворювачі (далі – АЦП).

*Комп'ютерна діагностична система* передбачає обмін інформацією між діагностичним комп'ютером зовнішнього підключення та бортовим комп'ютером, на базі якого інтегрована бортова діагностична система. У таких системах головні діагностичні функції реалізуються на базі елементів, наприклад, штатного обладнання автомобіля (рис. 2.3, в).

У такому разі діагностична система за категорією засобу поділяється на «діагностичне обладнання» і «діагностичне устаткування». При цьому діагностичний комп'ютер (прилад), що підключається до бортового комп'ютера зазвичай виконує тільки функції операторської периферії (клавіатури та монітора). Узгодження рівнів цифрових сигналів, утвореної у такий спосіб локальної комп'ютерної мережі, здійснюється за допомогою адаптера.

*Інтегровані діагностичні системи* належать до класу вмонтованих засобів діагностики, які вбудовані у мехатронні системи на програмному та апаратному рівнях. Такі системи виконують декілька пасивних (спостереження, інформування) та активних (резервування, адаптація) функцій, реалізація яких базується на використанні експертної програми.

*Експертна система* (далі – ЕС) – програма, що використовує експертні знання (знання спеціалістів) для забезпечення ефективного рішення неформалізованих задач в інтерактивному режимі [6–10].

*Неформалізовані задачі* властиві мають певні ознаки:

- завдання не можуть бути задані в числовій формі;
- мету не можна виразити в термінах точно визначеної цільової функції;
- не існує алгоритмічного рішення задачі;
- наявність ознак помилковості, неоднозначності й суперечливості вихідних даних.

Функціонування ЕС базується на використанні знань, а маніпулювання ними здійснюється на базі евристичних правил, які сформовані експертом. Експертні системи видають поради, проводять

аналіз, виконують класифікацію, дають консультації та ставлять діагноз. На відміну від звичайних програм, які використовують процедурний аналіз, ЕС вирішують задачі у вузькій предметній сфері на основі дедуктивних міркувань.

Окрім функціонального призначення, ЕС класифікують за декількома структурними ознаками [7,8]:

- способом формування рішення (аналізувальні або синтезувальні);
- часового обліку (статичні або динамічні);
- видів даних та знань (детерміновані або невизначені);
- кількістю джерел знань.

Під час розробки ЕС для певних предметних сфер використовують існуючі програмні оболонки:

1) SHELL – базовий елемент операційної системи, що визначає інтерпретацію команд і дій користувача;

2) CLIPS – система, що використовує висновок від фактів до мети;

3) DYNACLIPS – включає дошку оголошень, механізм динамічного обміну знаннями та інструментальні засоби для CLIPS;

4) FuzzyCLIPS – використовується для представлення та управління нечіткими фактами та правилами, має дві базисних концепції про неточність, нечіткість і невизначеність;

5) OPS5 – містить механізми подання знань та управління, дає змогу програмісту використовувати символи та представляти відношення між символами, за правилами, які пропонує програміст;

6) WindExS – повнофункціональна ЕС на базі Windows; містить механізм логічного висновку, диспетчер файлів, інтерфейс користувача, адміністратор повідомлень та модулі бази знань; підтримує висновок від фактів до мети та графічне представлення бази знань;

7) RT-EXPERT – експертна система загального призначення, що дає змогу програмістам інтегрувати правила експертної системи в прикладні програми.

Оснoву ЕС становить *база знань* (формалізовані емпіричні знання), яка призначена для зберігання довгострокових даних, що описують об'єктну сферу та правила доцільних перетворень даних цієї області.

Аналіз об'єктної сфери в ЕС здійснюється шляхом вибору адекватного рішення із бази знань при надходженні *бази даних*, які визначають окремі факти, що характеризують об'єкти, процеси та явища в предметній сфері.

Наприклад, стосовно діагностики автомобіля, як об'єктної сфери розглядається мехатронна система, а як предметна – її технічний стан. У

такому разі як база знань розглядаються допустимі (еталонні) значення діагностичних параметрів і алгоритми функціонування справної системи (далі по тексті – база даних), а як база даних – поточні (фактичні) значення діагностичних параметрів і алгоритми функціонування системи за фактом їх реалізації (далі по тексті – поточні дані).

Отже, уся поточна інформація про стан мехатронної системи, яка надходить та зберігається в ЕС, становить параметри електричних величин (сигналів), які аналізуються в інтерпретованому (кодовому) виді шляхом порівняння (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Структурна схема діагностичної експертної системи

Залежно від призначення та режиму функціонування, інтегровані діагностичні системи мають різну структуру та поділяються на інформаційні та самодіагностичні системи, а також системи адаптації та резервування (рис. 2.5).

*Інформаційна діагностична система* (рис. 2.5, а) – інтегрована система, побудована на базі експертної системи та призначена для контролю діагностичного параметру (далі – ДП) об’єкта керування. Така система виконує пасивні функції діагностики (наприклад, реєстрацію відхилень ДП за межі припустимих значень).

Сигнали давачів інформаційної системи не використовуються для реалізації процесу керування об’єктом і розглядаються тільки як діагностичні параметри. У базі даних ЕС зберігаються припустимі значення параметрів сигналів переліку давачів інформаційної системи.

*Система самодіагностики* (рис. 2.5, б) – інтегрована діагностична система, побудована на базі експертної системи. Вона призначена для діагностики елементів системи керування (давачів, виконавчих пристроїв, ЕБК) та виконує пасивні функції діагностики (реєстрація факту та локалізація несправності). Інформаційні сигнали давачів і сигнали керування виконавчими пристроями системи самодіагностики

використовуються для реалізації процесу керування об'єктом. Отже, режимні (робочі) сигнали системи керування (об'ємні стрілки зв'язків) одночасно розглядаються і як діагностичні параметри (тонкі стрілки зв'язків).

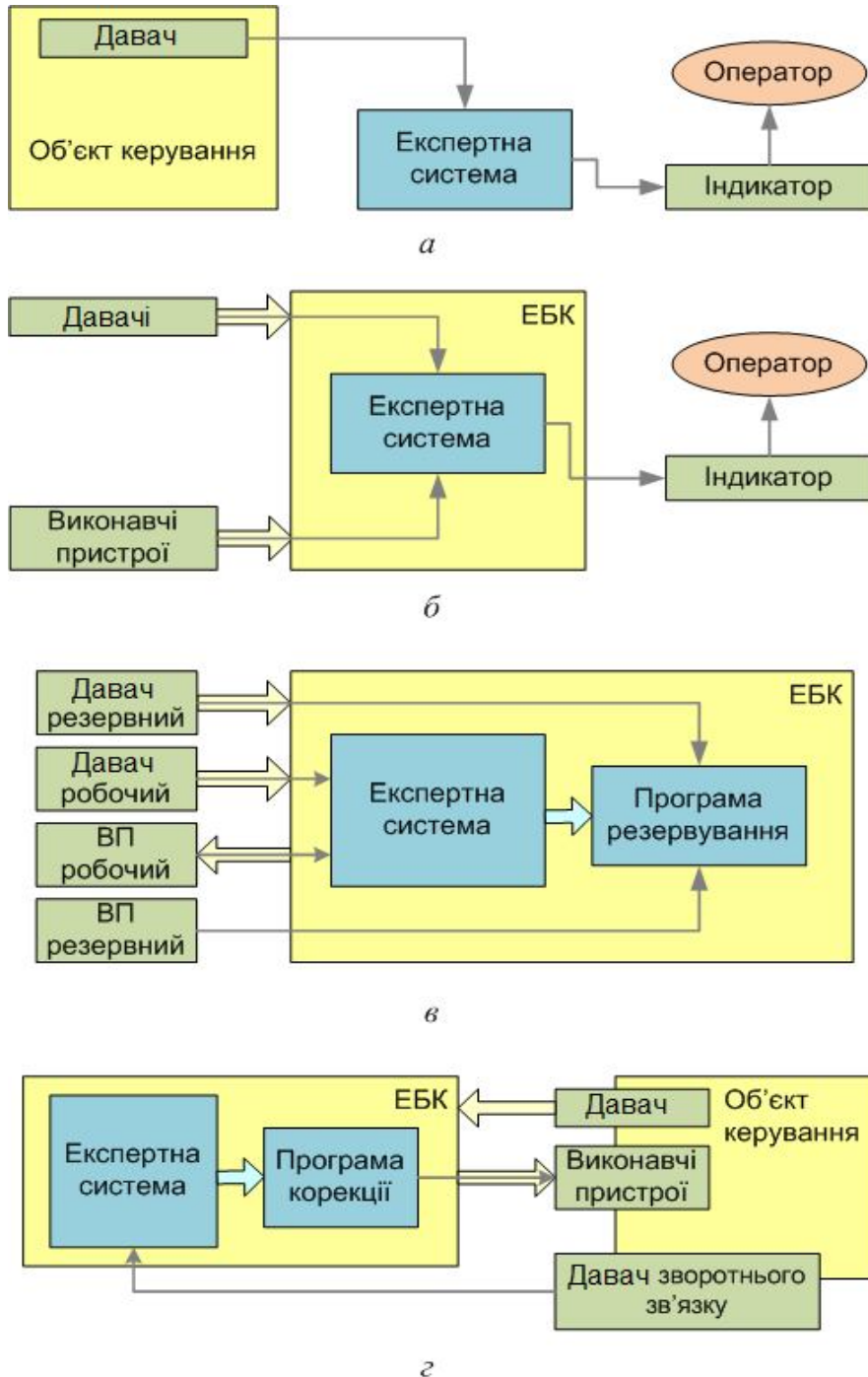


Рисунок 2.5 – Структурні схеми інтегрованих діагностичних систем:  
а – інформаційна; б – самодіагностики; в – резервування; г – адаптації

*Система резервування* (рис. 2.5, в) – інтегрована діагностична система, яка побудована на базі експертної системи, що призначена для

підтримки працездатності мехатронної системи у разі виходу з ладу окремих її елементів та виконує активні функції діагностики (апаратна заміна елемента або програмне заміщення сигналу).

Система резервування, як і система самодіагностики, базується на аналізі поточної інформації, що надходить із робочих сигналів системи керування.

*Система адаптації* (рис. 2.5, з) – інтегрована діагностична система, яка побудована на базі експертної системи. Вона призначена для підтримки оптимального керування об'єктом у разі впливу на мехатронну систему дестабілізуючих факторів (зовнішніх, структурних) і виконує активні функції діагностики (корекцію функцій перетворення у середовищі ЕБК).

Система адаптації відтворює функції системи автоматичного керування (стабілізації вихідного параметру), де в контурі зворотного зв'язку використовується давач вихідного сигналу (параметру). Як опірний рівень розглядається зразкове значення цього параметра, що зберігається в базі даних ЕС.

## **2.4 Засоби діагностики мехатронних систем**

Надійність роботи електромехатронних систем визначають засоби постановки діагнозу з використанням методів діагностування, що реалізуються для визначеного об'єкта.

Засоби діагностики систем мають декілька ознак, які складаються з наступного:

- перевірок технічної системи;
- визначення діагнозу пошкоджень;
- побудови діагностичної системи;
- місця та умови проведення діагностичних операцій;
- засобу діагностики, який використовується.

Приклад класифікаційної структури засобів діагностування механічних систем проілюстрований на рисунку 2.6.

Методи діагностування технічних систем за видом перевірок можна класифікувати за такими ознаками: характером участі людини у процесі діагностування; засобом виявлення несправності; засобом відтворення при перевірках методами заміни; типом пошуку; гнучкістю реалізації алгоритмів діагностування; глибиною локалізації несправності [7,8].

За характером участі людини у процесі діагностування розрізняють *органолептичні* (суб'єктивна оцінка за ознаками та симптомами

несправностей), *статистичні* (аналіз напрацьованої інформації про відмови) та інструментальні або апаратні (із використанням засобів діагностики) методи визначення технічного стану об'єкта.

Під *інструментальними* розуміють методи, в яких використовуються неелектричні засоби контролю (вимірювальний інструмент, механічне обладнання, прилади безпосередньої оцінки), а під *апаратними* – де застосовуються електричні вимірювальні прилади, які контролюють електричні та неелектричні параметри.

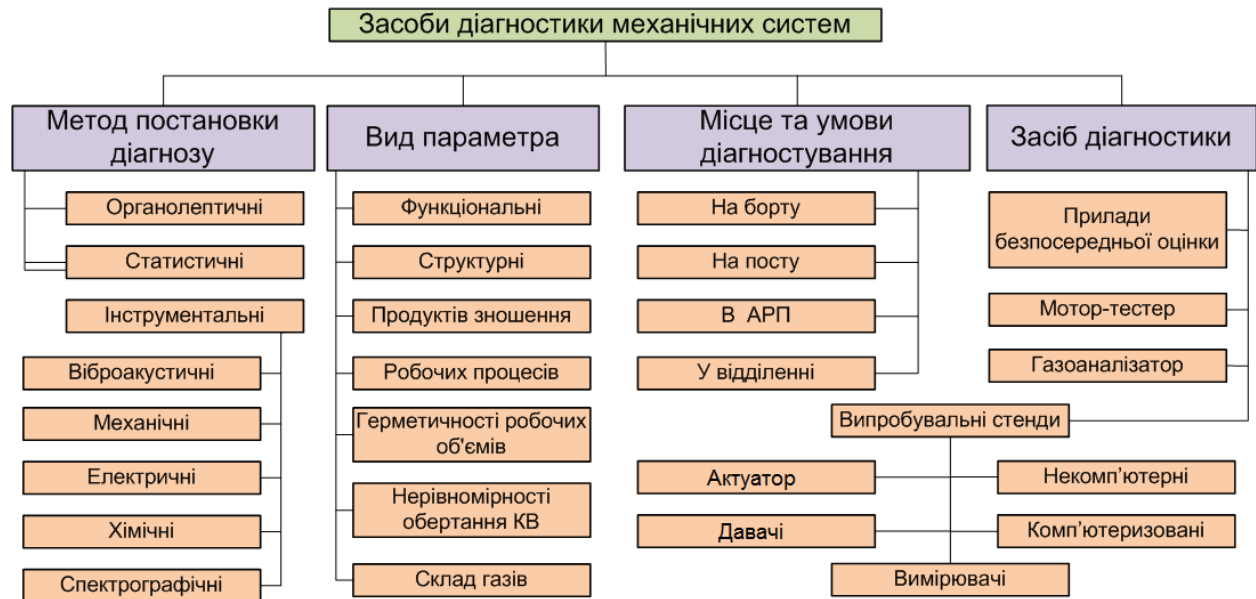


Рисунок 2.6 – Класифікаційна структура засобів діагностування технічних систем

Сучасні апаратні методи діагностики передбачають використання спеціальних випробувальних стендів та комплексів, структура яких складається з електромеханічних приводів (актуаторів), давачів неелектричних величин, електричних засобів відображення інформації (вимірювальні прилади) та пристроїв перетворення вимірюваних сигналів до інформаційних.

Обраний параметр визначає метод постановки діагнозу (принцип побудови діагностичної системи) та, відповідно, і засіб діагностики, у якому ці функції реалізовано. До того ж усі ці позиції щодо об'єкта діагностики можуть бути альтернативними.

За структурною ознакою розрізняють комплексну діагностику за вихідними характеристиками транспортних засобів (далі – ТЗ) (функціональними параметрами), системну й агрегатну діагностику, та діагностику вузлів і складальних одиниць за структурними параметрами.

Залежно від цього обумовлюються місце та умови проведення діагностичних операцій.

Зазвичай комплексна діагностика проводиться на посту, системна – на борту ТЗ, агрегатна – в умовах електричної ділянки або авторемонтного підприємства (далі – АРП). Тестове діагностування проводять за статичних умов, а функціональне – під час випробувань системи. Перевірки можуть проводитись з працюючими (активованими) або непрацюючими агрегатами та системами.

Значна увага приділяється системам ходової частини ТЗ, від яких залежить безпека руху автомобіля (гальма, кермо, підвіска). Загальний технічний стан гальмівної системи оцінюють за допомогою *деселерометрів* (вимірювачів уповільнення руху ТЗ) та *деселерографів* (реєстраторів процесу уповільнення). На постах діагностування розповсюджені *роликові стенди* (з біговими барабанами), де використовуються сили зчеплення колеса ТЗ з опорною поверхнею, та стенди, де гальмівний момент передається безпосередньо через колесо або через маточину [7, 8, 9].

Діагностування органів керування полягає у перевірках ступеня зношування й люфтів сполучених деталей, деформації важелів і тяг, порушення регулювань. Наприклад, діагностування рульового керування ТЗ здійснюється шляхом оцінки сумарного окружного люфту (за шкалою люфтоміра) та значення сили тертя (за показаннями динамометра).

Діагностичні параметри електричних та електронних пристроїв і систем можна розділити умовно на декілька груп: параметри постійних значень, параметри діючих значень, часові параметри, параметри форми.

Для електричних систем здебільшого альтернативними параметрами є струм споживання, електричний опір кола живлення, напруга на ділянках кола. Для контролю цих параметрів на борту будь якої електромеханічної системи застосовують універсальні вимірювальні прилади.

До приладів оцінки параметрів постійних значень належать вимірювачі електричного опору  $R$  (омметри), постійної напруги  $U$  (вольтметри) та струму  $I$  (амперметри). Омметри використовуються для «холодної» перевірки кіл та дискретних елементів схеми. Вольтметри та амперметри використовують для оцінки діагностичних параметрів при ввімкнутому об'єкті діагностування. Діагностичні параметри діючих значень, до яких належать напруга змінного струму та змінний струм, вимірюють амперметрами та вольтметрами змінного струму.



Функції перелічених вимірювальних приладів зазвичай реалізовані в комбінованих приладах універсального (мультиметри) або, наприклад, автомобільного (автотестери) застосування.

Часові параметри електричних сигналів (частота  $f$ , тривалість імпульсу  $t$  та їхня шпаруватість  $q$ ) дають змогу оцінити роботу задавальних, формувальних і релаксаційних кіл, а також каскадів електронних пристроїв систем керування та вимірюються за допомогою частотомірів та осцилографів.

Параметри форми сигналу (амплітуда, крутизна фронтів, нерівність вершини імпульсу) використовуються для оцінки значень розподілених реактивних параметрів імпульсних кіл (електронних блоків, системи запалювання тощо) та вимірюються за допомогою осцилографів.

Фазовий зсув між періодичними гармонійними сигналами однакової частоти (напруги та струму) характеризує реактивну складову опору кола змінного струму і вимірюється за допомогою осцилографів.

В імпульсних пристроях фазовий зсув періодичних сигналів взагалі розглядається як функціональний параметр.

В електричних системах транспортного засобу застосовуються перетворювачі електричної енергії різного призначення (прилади освітлювання, нагрівачі, актуатори тощо).

Також до переліку діагностичних параметрів можна додати неелектричні параметри: сили та напрям світлового пучка головних фар, температуру нагрівальних елементів, робочі зазори тощо. До переліку методів вимірювання у такому разі потрібно додати відповідно оптоелектричні, термоелектричні, тензометричні тощо, а до переліку діагностичних приладів – реглоскоп, термометр, динамометр тощо.

Після локалізації несправної системи, пристрою або агрегата у ТЗ чи за умов статики, їх направляють на електричну ділянку для усунення несправності (технічне обслуговування та заміна структурних елементів) або для відновлення агрегата (перемотування обмоток, проточування якорів).

У першому випадку застосовуються спеціальні стенди та спеціалізовані прилади агрегатної діагностики, у другому – стаціонарне промислове устаткування. Комп'ютерна діагностика мехатронних систем під час руху та випробувань ТЗ здійснюється за допомогою портативних діагностичних сканерів.

## **Контрольні питання**

1. Перелічити головні принципи мехатроніки. Проаналізувати їхні особливості.
2. Що є мехатронними пристроями?
3. Перелічити ознаки мехатронних пристроїв.
4. Які основні функції здійснюють пристрої комп'ютерного керування?
5. Дати поняття синергетичної інтеграції.
6. У чому полягає сутність мехатронного підходу? Навести методологію побудови складних технічних систем.
7. Дати поняття гексаподів і що вони становлять? Навести приклади їх використання.
8. На чому концентруються тенденції діагностичного прогнозу та розвиток мехатронних систем?
9. У чому полягає мета створення мехатронних комплексів?
10. Привести класифікацію засобів діагностики транспортних засобів за призначенням та функціональним наповненням.

### **3 НАПРЯМИ ТА ПРИНЦИПИ РОЗВИТКУ МОДУЛІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

#### **3.1 Етапи й закони процесу еволюційного розвитку модулів технічних систем**

Підготовка та проведення перспективних системних заходів з розробки і створення мехатронних модулів вимагає всебічного аналізу тенденцій еволюції автоматичних машин і їхніх компонентів. Це відповідає потребам галузей, орієнтованих на використання модульних технічних систем, як закінчених виробів, так і компонентів обладнання та продукції.

Після винаходу машин одним із постійних напрямів людської діяльності стала розробка автоматичних механізмів, а в подальшому й робототехнічних систем. На межі ХХІ століття в процесі створення складних машин виникла стійка тенденція інтелектуалізації алгоритміки керування, яка супроводжується мініатюризацією модулів і компонентів технічних засобів. Це тісно взаємопов'язані, як форма та зміст, складники загального процесу розвитку техніки.

Технічна модульна система складається із сукупності взаємопов'язаних елементів, що утворюють конструкції, призначені для виконання однієї або кількох функцій, які необхідні людині або іншим технічним пристроям.

Технічна модульна система є матеріальною. Її можна вивчати, вдосконалювати, спрямовано видозмінюючи її складники [3–5].

Найважливішими елементами будь-якої технічної модульної системи є такі: робочий орган (виконавчий механізм), джерело енергії (привод), трансмісія (передавальний механізм) і орган керування. Очевидно також, що, виконуючи одну й ту саму функцію, технічні модульні системи можуть відрізнятися одна від одної за принципом своєї дії, а отже, і за елементами.

Отже, спрямоване створення нової технічної модульної системи проходить такі етапи: потреба людини (суспільства) – виникнення ідеї – пошук відповідних знань визначення принципу дії системи – вибір робочого органу – підбір інших елементів системи. Система буде працездатною, якщо мінімально працездатними будуть усі чотири органи.

Підвищення працездатності системи відбувається завдяки вдосконаленню всіх її органів. Це вдосконалення відбувається нерівномірно – то один, то інший елемент у своєму розвитку виривається вперед і змушує вдосконалюватися інших.

Незважаючи на зменшення характерного розміру, технічні системи в загальному випадку, як і раніше, володіють усіма функціональними підсистемами, що є властивими для «великих» машин. Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем завершуються переходом на якісно нові види техніки (рис. 3.1, де над S-подібними еволюційними кривими наведено назви етапів, а під ними – приклади відповідних типів техніки).

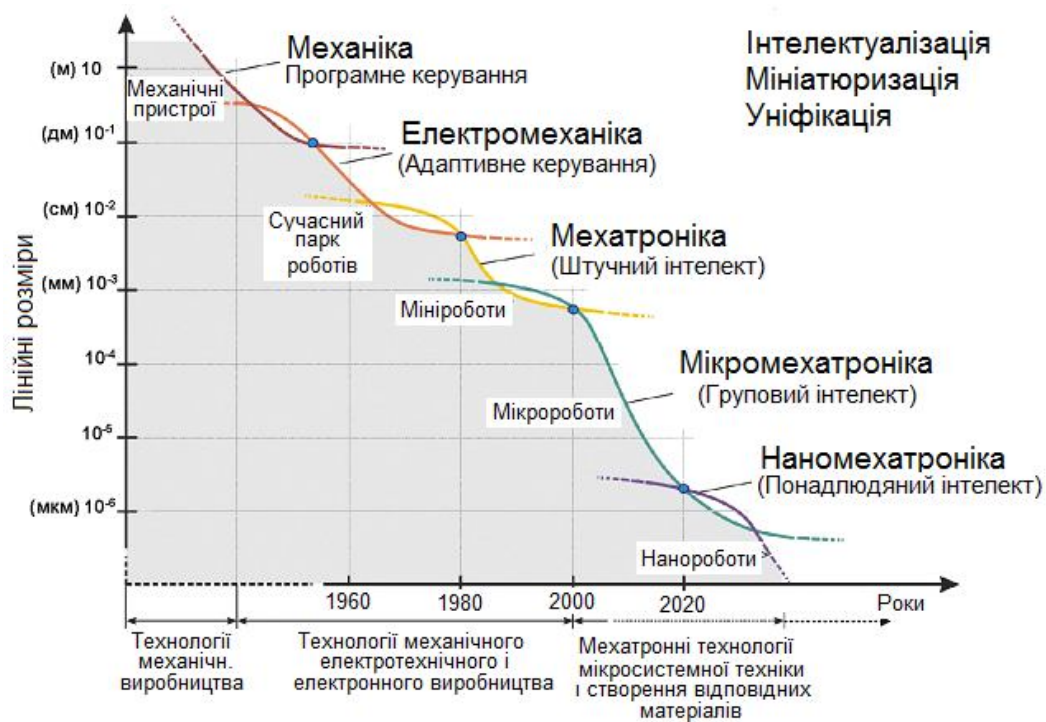


Рисунок 3.1 – Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем

Загальні закони розвитку техніки будь-якої галузі мають такі положення.

#### 1. Закон прогресивної еволюції техніки.

Дія закону прогресивної еволюції в світі техніки є аналогічною дії закону природного відбору Дарвіна в живій природі. Його суть полягає у тому, що технічний об'єкт з однаковою функцією при переході від покоління до покоління спричинений усуненням головного дефекту (дефектів), пов'язаних із поліпшенням будь-якого критерію (показника) розвитку за наявності певних техніко-економічних умов. Якщо ж розглядати всі переходи та всю історію конструктивної еволюції певного класу техніки, то можна спостерігати закономірності вичерпання можливостей конструкторсько-технологічних рішень на трьох рівнях.

У законі прогресивної еволюції вичерпання функціональності й ефективності конструкції не просто формальність. Поки не будуть

досягнуті оптимальні параметри, не може відбутися перехід до нового технічного рішення або до нового принципу дії.

## 2. Закон стадійного розвитку технічних модульних систем.

Будь-яка технічна модульна система у своєму розвитку проходить чотири стадії:

- реалізує тільки функцію обробки предмета праці (технологічна функція);
- реалізує функцію забезпечення процесу енергією (енергетична функція) поряд із технологічною;
- реалізує функцію керування процесом, крім технологічної та енергетичної;
- реалізує функцію планування, виключаючи людину з технологічного процесу, і крім всіх попередніх функцій.

## 3. Закон розширення безлічі потреб-функцій.

За наявності потрібного потенціалу та соціально-економічної доцільності виникла нова потреба, яка задовольняється за допомогою вперше створених технічних модульних систем. При цьому виникає нова функція, яка існує доти, доки її реалізація буде забезпечувати поліпшення життя людей.

## 4. Закон зростання різноманітності технічних модульних систем.

Різнманітність прогресивного розвитку техніки з часом монотонно та прискорено зростає. Це приводить до повного задоволення людських потреб, забезпечення високих темпів продуктивності праці й поліпшення інших критеріїв.

## 5. Закон зростання складності технічних модульних об'єктів.

Складність технічних об'єктів з однаковою функцією в силу дії факторів стадійного розвитку техніки та прогресивної конструктивної еволюції технічних систем від покоління до покоління монотонно та прискорено також зростає.

### **3.2 Тенденції розвитку технічних модульних систем**

Процес мініатюризації заснований на реалізації цієї тенденції в базових компонентах будь-якої техніки – сенсорних, інформаційно-керувальних, виконавчих (силових), енергоживлення (рис. 3.2).

Класичні рішення у сфері проектування та побудови технічних модульних систем засновані на можливості декомпозиції загальних технічних вимог щодо системи на етапі проектування технічного завдання, що широко використовується для машин і комплексів на макрорівні.

Прикладом конвергенції в різному розумінні (процес зближення, сходження компромісів) або взаємопроникнення функціональних підсистем є МЕМС-пристрої, у яких на єдиній мікроплатформі розміщені сенсорні, інформаційно-керувальні й виконавчі компоненти.

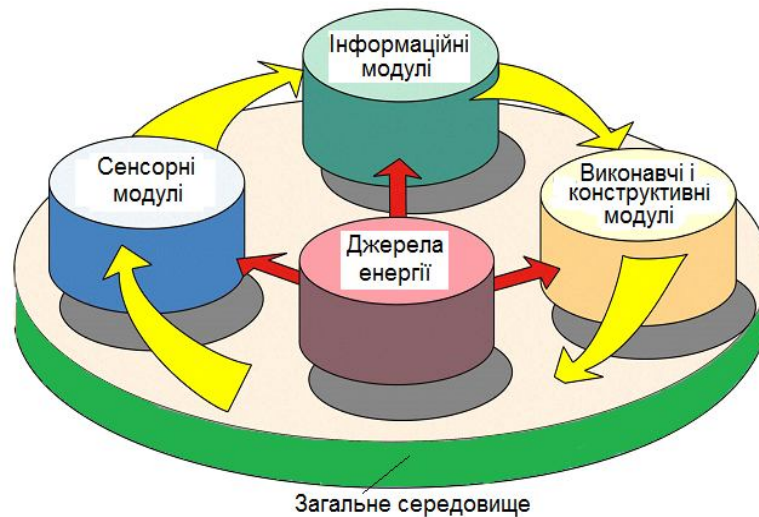


Рисунок 3.2 – Функціональна взаємодія складових технічної системи

При цьому, наприклад, фотодавачі інтегровані з мікропроцесорами, а п'єзоелементи одночасно є виконавчими пристроями.

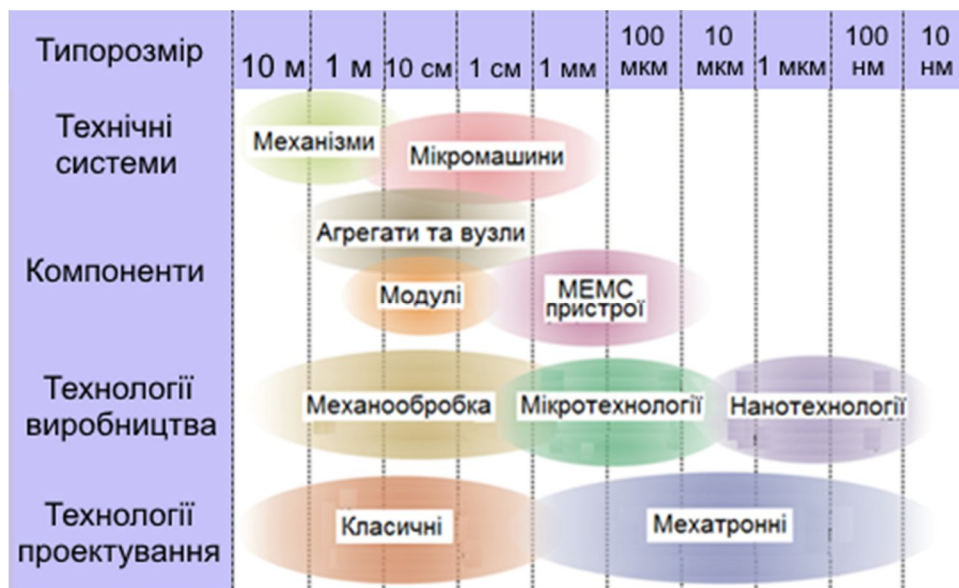


Рисунок 3.3 – Необхідності переходу до мехатронних технологій у процесі розвитку технічних систем

Прискорення процесу конвергенції диктується не тільки потребами у мініатюризації, а й тими широкими можливостями, які відкриваються з кожним новим рівнем взаємопроникнення підсистем. На певних стадіях

інтеграції з'являються реальні можливості для здійснення процесів самоорганізації та самовідтворення (рис. 3.3).

Прикладами вже стали новітні комплексні компоненти:

- *енергетичні* – це мініатюрні хімічні джерела струму, в яких полімерні мембрани з нанопористою структурою використовуються як ефективні наповнювачі електроліту;

- *інформаційно-керувальні* – радіаційно-стійкі мікроаналоги електронних ламп, а також мікромеханотроники, в яких холодний катод формується з вуглецевих нанотрубок;

- *сенсорні* – це хімічні сенсори на основі транзисторних структур із заздалегідь сформованими хемосорбційними центрами;

- *розподілені* тактильні сенсори, чутливі елементи яких виготовлені з нанокompозитних матеріалів;

- *давачі* кутових швидкостей і лінійних прискорень для систем орієнтації та навігації, у яких рухомі елементи виготовляються методами вирощування в процесі створення компонента модуля в цілому.

### **3.3 Принципи побудови мехатронних модулів робототехнічних систем**

Робототехніка та мехатроніка нерозривно пов'язані. Якщо прогрес у сучасній робототехніці визначається переважно успіхами мехатроніки, що забезпечує мініатюризацію та інтеграцію функціональних компонентів, то процес роботизації технічних засобів є одним з найважливіших стимуляторів і каталізаторів розвитку мехатронних технологій. Роботизація передбачає неухильне підвищення вимог у галузі інтелектуалізації та комплексної автоматизації складних систем. Мехатронні технології забезпечують цей процес шляхом створення проектно-технологічного базису.

Технології роботобудування базуються на тих самих принципах, що й мехатронні технології. Крім інтелектуалізації та мініатюризації до них належить низка технологій макрорівня: уніфікація компонентів і їхнього інтерфейсного взаємозв'язку, інтеграція функцій і взаємне проникнення (конвергенція) різномірних функціональних підсистем [10, 11].

Функціональний склад модуля та деталізація етапів їх історичного розвитку зображені на рисунку 3.4.



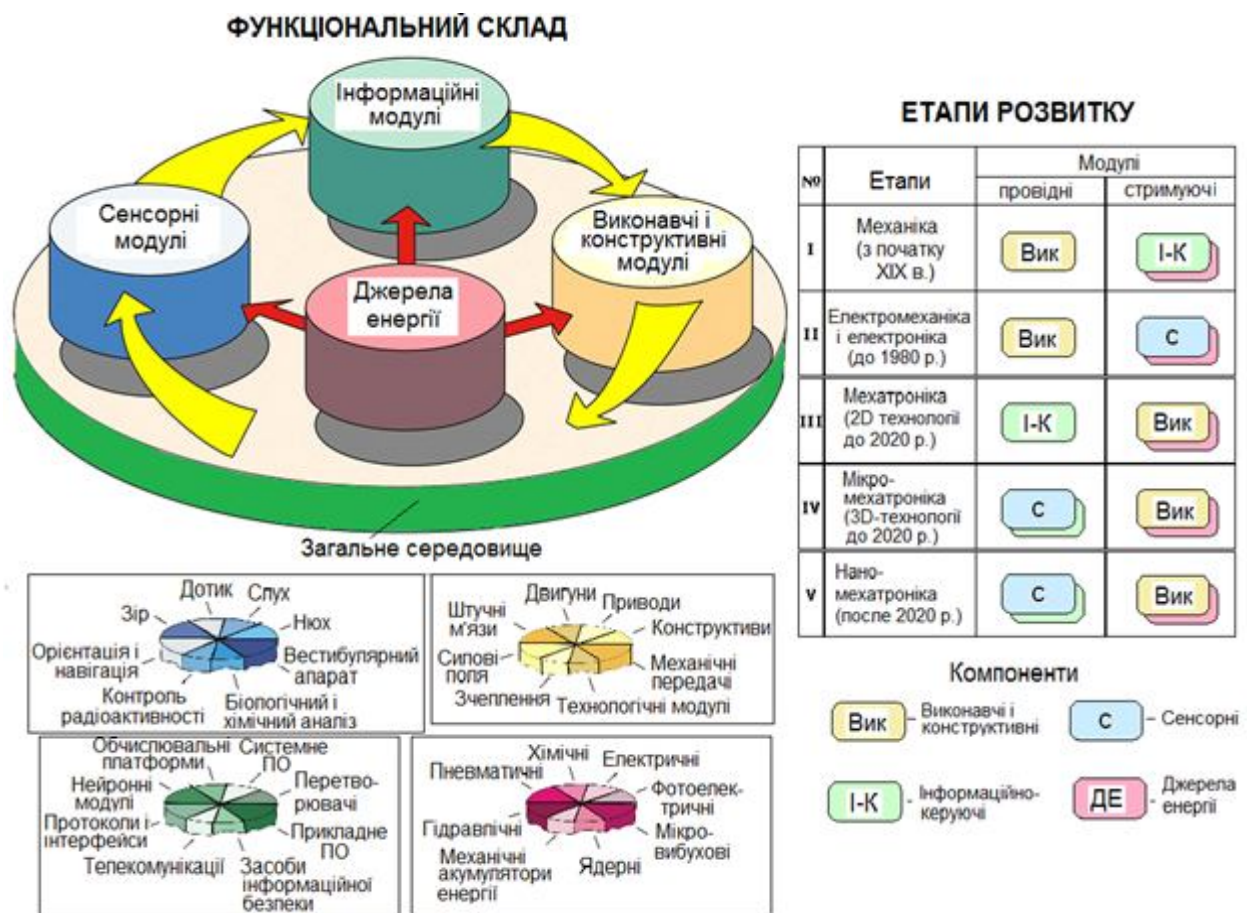


Рисунок 3.4 – Розвиток функціональних компонентів

*Сенсорна підсистема* представлена давачами, що реалізують функції слуху, дотику, технічного зору, орієнтації та геометричних параметрів об'єкта керування, його положення в просторі з метою навігації тощо.

*Виконавча підсистема* дає змогу здійснювати переміщення платформи (локомоцію), а також функціональні рухи – закріплення, захоплення, складання, позиціонування тощо. Маніпуляції систем відбуваються шляхом застосування приводів, механічних передач, захватів і інших елементів впливу.

*Інформаційно-керувальна підсистема* забезпечує збір, обробку та зберігання інформації, генерацію сигналів керування, статичний і динамічний зворотній зв'язок, а також взаємодію з оператором або зовнішньою системою керування більш високого рівня за допомогою прийому-передачі інформації засобами зв'язку.

*Енергетична підсистема* регулює подачу й розподіл енергії інших підсистем, а також акумулювання енергії від зовнішніх джерел і її зберігання під час функціонування машини. Внутрішні енергокомпоненти можуть бути представлені хімічними, електричними, ядерними,



мікровибуховими, пневматичними та іншими подібними джерелами енергії.

Критичними з точки зору необхідності принципово нових підходів до розробки, є виконавчі й енергетичні компоненти, що вимагають у цих сферах організацію умов для проведення базових інновацій.

Сенсорні та інформаційно-керувальні компоненти широко засвоєні, що поліпшує подальші інновації та акцентує увагу при розробці нових підсистем. Наприклад, розвиток сучасних засобів глобальної навігації забезпечило їх широке застосування на побутовому рівні. Це дає змогу прогнозувати оснащення автотранспортних засобів навігаційним обладнанням і використовувати їх як невід’ємні вимоги для подібних систем вже у найближчому майбутньому.

На підставі аналізу складових компонентів окремих підсистем як ключових параметрів, до яких висуваються базові технічні вимоги (рис. 3.5), пропонуються характеристики.



Рисунок 3.5 – Перелік базових технічних вимог щодо мехатронних модулів

Наведений аналіз об’єктивної тенденції розвитку підходів до побудови технічних систем показує необхідність масштабних заходів щодо системної розробки та програмного впровадження мехатронних технологій, а також для реалізації потреб промисловості на сьогодні та в перспективі на найближчі 10–20 років.

На підставі прогнозу й системного аналізу перспективних потреб усіх галузей господарства країни необхідно на державному рівні взятися до випереджальної розробки зазначених вище компонентів у вигляді системи уніфікованих мехатронних модулів, що охоплює увесь типорозмірний діапазон виробів машинобудування, базуючись на перспективних технологіях виробництва.

Як перші кроки в зазначеному напрямі доцільно найближчим часом на базі великих наукових центрів, що володіють необхідним досвідом розробки розглянутих систем, розгорнути виробництво мікроробототехнічних систем нового покоління, які побудовані з застосуванням мехатронних технологій проектування. При цьому необхідно використовувати сучасні MEMC-компоненти як технологічний базис.

Процес створення функціональних машин (технічних систем) наведений на рисунку 3.6 і відображає застосування технологій комплексування та уніфікації для створення базових мехатронних модулів на конкретних прикладах.



Рисунок 3.6 – Процес створення функціональних мікромашин і систем

Так, застосування мехатронних модулів мікронного типорозміру дає змогу говорити про розробку розподілених систем-компонентів на основі мультиплексування та на базі мікрочипів із високим рівнем інтелектуалізації.

Це забезпечує достовірність і стійкість отриманих даних та інформації. Подібний підхід багаторазово підвищує рівень надійності системи завдяки можливості перенесення частини функцій, що вийшли з

ладу компонентів на інші без істотного зниження технічних характеристик під час виконання критичних операцій.

Комплексний характер підходу до розробки мехатронних модулів вимагає системної інтеграції всіх проведених робіт, що підтверджується досвідом розробки та створення зарубіжних аналогів. Типовий приклад – інтегровані комп’ютерні виробничі комплекси вітчизняних і закордонних систем.

Науково-технічна актуальність даної проблеми логічно впливає з переваг технічної модульної системи, побудованої за мехатронним принципом: інтелектуальність, адаптивність, надійність, мініатюрність.

### **3.4 Принципи робототехніки та розвиток пріоритетних напрямів технічних модульних систем**

Принципи робототехніки та мехатроніки (див. розділ 2) пов’язані між собою та мають загальну теоретичну основу [1, 10, 11].

Істотну специфіку має тільки принцип уніфікації, який визначає особливості застосування робототехніки:

- широка номенклатура;
- складність технічних вимог щодо засобів робототехніки, яка часто перебуває на межі можливостей сучасної техніки;
- незначні потреби елементів у окремих типах робототехнічних систем.

Ці особливості є підставою для вирішення завдання уніфікації засобів робототехніки шляхом їх побудови з функціонально й конструктивно уніфікованих компонентів – мехатронних модулів у вигляді їх типорозмірних рядів з модульною системою програмного забезпечення.

Переваги модульного принципу побудови полягають у такому:

- скороченні термінів створення, освоєння у виробництві та в експлуатації технічних модульних систем;
- проектуванні систем, що зводиться до компонування зі стандартних компонентів, а їх виробництво – до збирання з них, яке може бути організовано практично на будь-якому машинобудівному підприємстві;
- можливості практично необмеженого розширення номенклатури технічних систем, зокрема оперативне компонування різних їх модифікацій для конкретних разових застосувань;

- скороченні у кілька разів собівартості систем завдяки здешевленню їх частин при переході до уніфікованих серійних модулів і зменшенні структурної та параметричної надмірності;

- скороченні витрат на розробку, експлуатацію та ремонт технічних модульних систем;

- зростанні їх технічного рівня, зокрема надійність, застосування відпрацьованих стандартних модулів.

Ефективність модульного принципу не виключає застосування в робототехніці інших принципів побудови техніки. Наприклад, досвід промислової робототехніки показує, що при проектуванні транспортних і вантажно-розвантажувальних робіт оптимальним принципом їх побудови є створення таких систем на основі попередньо відпрацьованих базових конструкцій. При створенні технологічних робіт для виконання таких операцій, як зварювання, різання, складання, часто виявляється найефективнішим агрегатний принцип проектування.

Необхідно також зважати на те, що модульна побудова техніки має і свої недоліки, які обумовлені з неминучим деяким завищенням вагогабаритних характеристик і кількості проміжних механічних і електричних з'єднань.

*Організаційні принципи.* Розвиток мехатроніки та робототехніки як комплексного міжгалузевого науково-технічного напрямку вимагає адекватної державної організації. Саме так починався розвиток робототехніки.

Наприклад, в Японії, яка визнана лідером у цій сфері, усі досягнення отримані саме завдяки тому, що випереджальний розвиток робототехніки було визнано стратегічним державним завданням. Аналогічний підхід був реалізований і у низці європейських країн.

До головних державних завдань належать:

- визначення номенклатури функціональних компонентів і технічних вимог щодо мехатроніки й робототехніки (з виділенням першочергових потреб) на основі аналізу потреб у коштах.

- уніфікація цих компонентів, їх розробка й організація промислового випуску. Це дасть змогу в 2-3 рази скоротити номенклатуру продукції, а, відповідно, і витрати на розробку, підвищити серійність виробництва, знизити вартість та підвищити якість;

- розробка на цій основі першочергових базових мехатронних і робототехнічних систем і комплексів;

- промисловий їх випуск і відпрацювання в експлуатації.

Відповідно до завдань передбачені такі роботи:

- створення пріоритетних систем мехатроніки та робототехніки нового покоління;
- організація підготовки та перепідготовки кадрів, зокрема організаторів і управлінців.

Програма розвитку загалом повинна бути орієнтована на рішення першочергових найважливіших державних завдань (безпеку, технологічну незалежність, технічне забезпечення, розвиток критичних технологій і видів техніки за пріоритетними напрямками розвитку). Надалі ці рішення повинні тиражуватися та розвиватися для забезпечення інших потреб у коштах мехатроніки й робототехніки.

При розробці й організації виробництва відповідних виробів необхідно керуватися таким:

- створенням виробів, які гарантовано конкурентоспроможні на світовому ринку;
- рішенням задач імпортозаміщення та організації виробництва кращих в світі зразків цієї техніки, але істотно меншою вартістю.

Як зазначено вище, рішення цієї проблеми ґрунтується на подальшому розвитку таких критичних технологій:

- технології мехатроніки та створення мікросистемної техніки;
- технології створення інтелектуальних систем;
- біоінформаційної технології;
- обробки та захисту інформації;
- біосенсорної технології.

Отже, розглянута комплексна проблема належить відразу до кількох пріоритетних напрямів розвитку науки й техніки. Насамперед, це індустрія наносистем і матеріалів, живі системи, інформаційно-телекомунікаційні системи. Особливе значення пропонується підхід має при створенні й реалізації технічних засобів для забезпечення безпеки та протидії тероризму.

### **Контрольні питання**

1. Які існують етапи еволюційного розвитку технічних модульних систем?
2. Які існують закони розвитку техніки будь-якої галузі й у чому полягає їх особливість?
3. Обґрунтувати функціональну взаємодію складників технічних систем.

4. Проаналізувати етапи переходу до мехатронних технологій у процесі розвитку технічних систем.
5. Перелічити приклади комплексних компонентів системи та обґрунтувати їхню особливість.
6. Які існують види підсистем і у чому полягає їхня особливість?
7. Проаналізувати та обґрунтувати процес створення функціональних машин базових мехатронних конструкцій.
8. Обґрунтувати особливості створення модульного принципу мехатронних систем.
9. Перелічити завдання та подальші роботи, щодо створення модульних систем.
10. Які існують технології розвитку електромехатронних систем?

## 4 ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ

### 4.1 Головні поняття та терміни теорії надійності

Питання надійності роботи електромеханічних та інших систем постійно виникає під час створення їхніх конструкцій. Це стосується також і мехатронних модулів і систем. Подальша їх експлуатація може призвести до виходу з ладу елементів, що впливають на надійність роботи.

Як довів досвід експлуатації технічних систем, питання надійності та діагностики елементів пов'язані між собою. Розглянемо деякі їхні закономірності [6–8].

Теорія надійності встановлює:

- закономірності виникнення відмов у різних виробках;
- вивчає вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на процеси, що відбуваються під час їх роботи;
- закладає основи розрахунку надійності та прогнозування відмов;
- визначає способи підвищення надійності у процесі конструювання, виготовлення та експлуатації виробів;
- визначає методи збору, обліку та аналізу статистичних відомостей, що характеризують надійність.

Теорія надійності складається з таких понять.

*Предмет* – становить сукупність математичних методів, що базуються на теорії імовірності та математичній статистиці, організаційних і технічних заходів.

*Об'єкт* – це предмет певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, експлуатації, вивчення, дослідження та випробувань на надійність. Об'єктами можуть бути системи та їхні елементи, зокрема технічні вироби, пристрої, апарати, прилади, їхні складники, окремі деталі тощо. Вони можуть перебувати у різних станах та мати різні пошкодження. Під час аналізу та оцінки надійності конкретні технічні пристрої називаються узагальненим поняттям «об'єкт».

*Надійність* – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Надійність є комплексною властивістю, яка, залежно від призначення об'єкта та умов його застосування, може включати: безвідмовність; довговічність; ремонтпридатність; збережуваність, або поєднання цих властивостей.

*Показник надійності* – кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що становлять надійність об'єкта.

*Безвідмовність* – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання.

*Довговічність* – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту [6, 7].

*Ремонтпридатність* – властивість об'єкта, що полягає у пристосованості до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування та ремонту.

*Збережуваність* – властивість об'єкта зберігати у заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції під час та після зберігання та транспортування.

У теорії надійності розрізняють безліч типів відмов (ресурсні, незалежні, раптові, поступові, експлуатаційні тощо), що впливають на працездатність конструкцій та їхніх елементів. Відмови у роботі характеризуються поняттям напрацювання за деякий період (годин, кілометраж пробігу тощо).

*Ресурс* – сукупне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

*Термін служби* – календарна тривалість експлуатації від початку експлуатації об'єкта або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан [6, 7].

Теорія надійності розглядає багато питань, що характеризують надійність роботи виробів. Головні положення теорії надійності можуть використовуватися і для нових конструкцій електромехатронних модулів, систем і комплексів.

## **4.2 Методи прогнозування надійності**

На сьогодні у різних сферах науки та техніки існує досить багато методів прогнозування показників надійності, що відрізняються сукупністю розв'язуваних завдань і особливостями застосовуваного математичного апарату.

За обсягом інформації, що використовується для прогнозу, ці методи можна розподілити на три групи:

– методи експертних оцінок, що застосовуються в тих випадках, коли відсутня достовірна інформація про об'єкт і дані про зміни його стану за час експлуатації;



– методи, які засновані на екстраполяції та використовуються в тих випадках, коли є достатньо повні дані, але невідомі загальні закономірності зміни стану об'єкта за час експлуатації;

– методи моделювання, які використовуються за наявності достатнього обсягу статистичних даних про зміну стану однотипних об'єктів у процесі експлуатації.

Широко використовуються під час прогнозування технічного стану об'єктів методи екстраполяції.

Основою для прогнозування технічного стану є аналітичне прогнозування, при якому за багатовимірним вектором станів  $S (s_1, s_2, \dots, s_n)$  або діагностичних сигналів  $X (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , певних або виміряних у моменти часу  $(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k)$ , необхідно визначити їх значення в наступні моменти часу  $t_j (j = k + 1, \dots, k + l)$ .

Аналітичне прогнозування стану технічних об'єктів ґрунтується на об'єктивному існуванні певної тенденції у зміні їхніх параметрів стану або діагностичних сигналів під час експлуатації. Головні закономірності можна охарактеризувати деякою часовою функцією. При цьому вважається, що ця залежність, звана трендом (trend, англ. – тенденція), яка виражає усереднену у часі для певного періоду спостереження тенденцію, може бути екстрапольована на наступні періоди часу.

Використання аналітичних методів, при прогнозуванні технічного стану об'єкта сприяє отриманню масиву ретроспективних значень прогнозованого параметра  $X (t_i)$ , а також виділенню тренда у вигляді апроксимуючої тимчасової функції, і оцінці точності прогнозу.

Знаходження функції регресії  $f (t) = x (t)$ , що апроксимує характер зміни параметра (процесу) у часі, грає важливу роль у завданні прогнозування, оскільки визначає фактично результати екстраполяції тренда.

Для вибору виду апроксимуючої функції використовуються різні методи. Наприклад, широко використовується метод послідовних різниць, що визначає ступінь апроксимуючого полінома, а також критеріальні методи, що засновані на оцінці критерію близькості фактичної кривої до розрахункової.

### 4.3 Етапи та задачі надійності

Головним шляхом забезпечення надійності електромехатронних пристроїв та систем є підвищення якості проектування та виготовлення. Загалом сукупність факторів надійності впливає на роботоздатність базових елементів конструкцій.

Для забезпечення необхідних характеристик електромехатронних пристроїв та визначення їхніх конструкційної надійності необхідно проводити попередню оцінку в три етапи. Розглянемо базові положення етапів.

На *першому* етапі проводиться розрахунок і порівняння показників надійності для різних варіантів виконання пристроїв і обирається оптимальний варіант. На цій стадії для розрахунку не потрібно ще знати точних значень показників надійності окремих елементів пристроїв, оскільки проводиться лише порівняльна оцінка розглянутих варіантів [6, 7].

На *другому* етапі виконується поглиблене дослідження надійності обраного варіанта, з тим щоб забезпечити виконання заданих умов. При цьому потрібно знати точне значення показників надійності елементів. Наприклад, виробництво сучасних електричних машин здебільшого має серійний характер, що надає машинам кожної серії значний ступінь подібності й полегшує екстраполяцію показників надійності на нові зразки. Кількісні показники надійності комплектувальних виробів повинні бути видані постачальником.

*Третій етап* контролю надійності включає випробування дослідних зразків і порівняння результатів із розрахунковими значеннями. Результати розрахунків і випробувань дають змогу вносити відповідні корективи в конструкцію, матеріали й інші варіанти виконання пристроїв.

Найважливішими засобами підвищення надійності електромехатронних пристроїв є спрощення та мінімізація конструкцій та застосування якісних активних і конструкційних матеріалів.

Водночас необхідно забезпечити на належному рівні техніко-експлуатаційні показники (питомі витрати активних і конструкційних матеріалів на одиницю потужності, мінімальні габарити й вартості тощо). Ці вимоги суперечать умовам вибору засобів для підвищення надійності, тому під час проектування електромехатронних пристроїв необхідно провести детальний аналіз усіх заходів для отримання заданої надійності. При цьому необхідне також ретельне проведення типових випробувань макетних і дослідних зразків на відповідність технічним вимогам за надійністю та розробка технічних умов, норм експлуатації та інших стандартних документів.

Основою теорії надійності є математичний апарат, що заснований на таких розділах сучасної математики, як: теорія ймовірностей і математична статистика, теорія випадкових процесів, теорія масового обслуговування,

математична логіка, теорія графів, теорія оптимізації, теорія експертних оцінок, теорія великих систем тощо.

Завдяки теорії надійності визначаються практичні завдання, що пов'язані зі статистичною оцінкою та аналізом пристроїв, а також прогнозуванням, випробуванням і оптимізацією технічних рішень щодо забезпечення надійності у процесі проектування, створення та експлуатації електротехнічного обладнання, установок і систем [3–7].

Для визначення проблем та вирішення задач надійності роботи електромехатронних систем необхідно:

- проаналізувати фактори, що можуть впливати на негативну роботу електромехатронної системи;
- розробити математичну модель взаємозв'язку окремих явищ, що визначають виникнення пошкоджень і порушень роботи установки та її відновлення як випадковий процес;
- дати пропозиції щодо врахування надійності в моделях прийняття технічних рішень у проектних і експлуатаційних завданнях [6].

Залежно від конструкції електромехатронних систем, або модулів і елементів, список задач дослідження параметрів надійності може бути розширеним.

#### **4.4 Прогнозування технічного стану електромехатронних систем**

Фізичні основи прогнозування технічного стану та процеси зміни властивостей і розмірів деталей і вузлів підпорядковуються певним законам, за якими можна прогнозувати зміни з певним ступенем точності.

За умовами технології виробництва технічні пристрої виготовляють із певними допусками в розмірах, та з урахуванням хімічних і структурних властивостей матеріалів.

На інтенсивність зношування деталей і вузлів пристроїв істотно впливає організація та періодичність технічного обслуговування й поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування та ремонти здійснюють нерегулярно або їх зовсім не проводять, то швидкість зношування вузлів і деталей значно збільшується та зношування швидко досягає своїх граничних значень. Унаслідок цього всі перелічені вище фактори впливають на імовірність прогнозування роботи обладнання [8].

Існуючі методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла обладнання до граничного значення.

Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану й зумовлені зношуванням або старінням матеріалу деталей або вузлів обладнання. Процеси зношування й старіння деталей і вузлів переважно містять детермінований (визначений) і випадковий складники, кожен із яких може мати переважний вплив для кожного конкретного випадку, що впливає на характер процесів зношування або старіння.

Головним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів систем і агрегатів.

*Ресурс* – це напрацювання об'єкта від початку експлуатації або її поновлення після ремонту до настання граничного стану, коли подальша експлуатація повинна бути припинена, зважаючи на вимоги техніки безпеки або економічні міркування.

У техніці найчастіше для визначення ресурсу користуються такими термінами, як доремонтний, міжремонтний, залишковий і використаний ресурс.

*Доремонтний ресурс* характеризується напрацюванням нового обладнання від початку експлуатації до першого ремонту, а *міжремонтний* – напрацюванням між ремонтами.

Під час прогнозування визначається також *залишковий ресурс*, тобто напрацювання обладнання від моменту діагностування (контролю) до граничного стану, обумовленого технічною документацією. Використаний ресурс характеризується напрацюванням обладнання після виготовлення або ремонту до моменту діагностування (контролю).

Для орієнтовного порівняння технічного стану елементів пристрою, що діагностується, з різними діагностичними параметрами, можна користуватися поняттям коефіцієнта технічного ресурсу, за допомогою якого оцінюють залишковий ресурс деталі, спряження або вузла.

Коефіцієнт технічного ресурсу ( $K_{tr}$ ) для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються під час експлуатації обладнання, визначають за формулою:

$$K_{tr} = \frac{P_g + P_v}{P_g - P_n}, \quad (4.1)$$

де  $P_g$  – граничне значення параметра;

$P_v$  – вимірне значення параметра;

$P_n$  – номінальне значення параметра.

Якщо під час експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу ( $K_{sr}$ ) визначається виразом:

$$K_{sr} = \frac{P_v - P_g}{P_n - P_g} . \quad (4.2)$$

Для нового елемента вузла або машини  $K_{sr} = 1$ , а при повному вичерпанні ресурсу  $K_{sr} = 0$ .

Відмова або загроза відмови зазвичай настає з пошкодження однієї-двох деталей або вузла, що зумовлено різною зносостійкістю деталей або вузлів обладнання. Конструкцією обладнання передбачається нескладна заміна деталей, які швидко зношуються. Після заміни або ремонту деталей, які вичерпали ресурс роботи, пристрій знову стає працездатним та отримує певний запас часу роботи до наступної загрози втрати працездатності.

Шляхи отримання результатів прогнозу об'єднують групи методів прогнозування:

- визначення параметрів технічного стану об'єкта;
- встановлення імовірності зміни характеристик контрольованих параметрів за певні межі;
- встановлення критеріїв працездатності або довговічності.

Відповідно використовують три методи прогнозування: аналітичний, імовірнісний і статистичної класифікації.

Метод *аналітичного прогнозування* застосовують для завдань, коли зміна контрольованого параметра інерційна у часі та всі зміни поступово накопичуються. Тоді завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції контрольованого параметра  $P(t)$  у минулому та теперішньому значенні функції, а також у майбутньому при визначенні моменту часу, коли параметр досягне свого допустимого значення  $P_\delta$ .

Метод *імовірнісного прогнозування* заснований на теорії імовірності й використовується при вирішенні практичних задач діагностування.

Теорія ймовірностей вивчає закономірності випадкових явищ, що часто повторюються. Для визначення параметрів імовірнісного прогнозування використовують поняття події та формули Баєса.

*Подія* – явище, що відбулося або не відбулося. Події можуть бути вірогідні або неможливі.

Імовірністю якоїсь події  $A$  називають число  $P(A)$ , яке характеризує можливість виникнення події. Імовірність вірогідної події визначається як  $P(a) = 1$ , а неможливої  $p(\bar{A}) = 0$ .

Імовірність випадкової події перебуває у межах  $0 \leq P(A) \leq 1$ .  
В інженерній практиці

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (4.3)$$

де  $m$  – кількість спроб, при яких подія  $A$  відбулася;  
 $n$  – загальна кількість виконаних спроб.

За великою кількістю спроб статистична ймовірність події наближається до істинної ймовірності події.

Наприклад, необхідно визначити приблизну оцінку імовірності безвідмовної роботи 100 штук тягових двигунів типу TN-81 для двох проміжків часу:  $t=1000$  і  $t=3000$  год. Середньостатистична величина інтенсивності відмов у частках одиниць на одну годину роботи двигуна становить:  $\lambda \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

*Розв'язання.* Середнє напрацювання до першої відмови двигуна визначається системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t} \\ Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \\ a(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \\ T_{cp} &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right\}, \quad (4.4)$$

де  $P(t)$  – імовірність безвідмовної роботи двигуна;

$Q(t)$  – імовірність відмови двигуна;

$a(t)$  – частота відмов або щільність їх імовірності;

$T_{cp}$  – середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови:

Кількісні характеристики надійності й інших величин технічного пристрою для експоненціального розподілу зображено на рисунку 4.1 [19–21].

При інтенсивності відмов  $\lambda = \text{const}$  середній час між сусідніми відмовами, або напрацювання на відмову,  $t_{cp} = T_{cp}$

Імовірність безвідмовної роботи за час роботи двигуна при  $t = T_{cp}$ :

$$P(t) = e^{-\lambda T_{cp}} = \frac{1}{e} \approx 0,37.$$

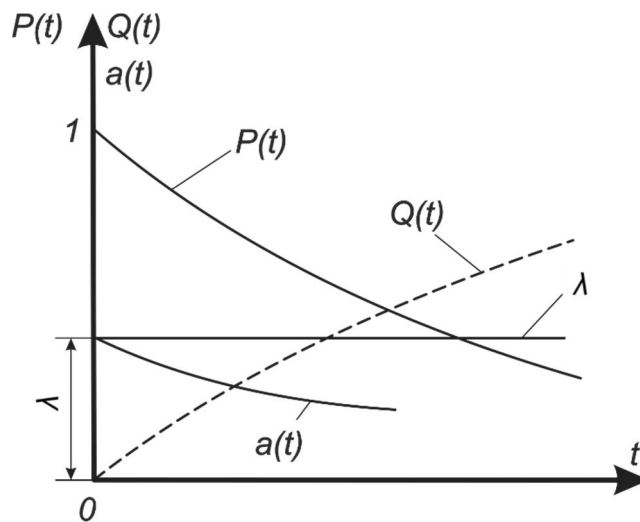


Рисунок 4.1 – Кількісні характеристики надійності технічного пристрою за експоненціальним розподілом

Імовірність безвідмовної роботи двигуна:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{\text{ср}}}}. \quad (4.5)$$

Середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} = 5 \cdot 10^4, \text{ год.}$$

Відповідно до вимог задачі імовірність безвідмовної роботи двигуна для двох проміжків часу його роботи:

$$P(1000) = e^{-\frac{1000}{5 \cdot 10^4}} = e^{-0,02} = 0,98;$$

$$P(3000) = e^{-\frac{3000}{5 \cdot 10^4}} = e^{-0,06} = 0,94.$$

Як показують отримані дані, надійність двигуна, що розглядається, характеризується тим, що на кожні 100 двигунів імовірність виходу з ладу на протязі вказаних двох проміжків часу роботи становить: у першому випадку – 2 двигуни, або 2 %, у другому – 6 двигунів, або 6 %.

Формула Баєса дає змогу визначити імовірність поломки, наприклад вузла  $B_i$  при появі ознаки  $A$  через відому імовірність поломки вузла  $B_i$  із попередніх досліджень  $P(B_i)$ .

Розглянемо приклад несумісних (дві разом не відбуваються) подій  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , що характеризують пошкодження відповідних вузлів. Вони створюють повну групу.

Припустимо, що з'являється подія  $A$ , яка характеризує пошкодження вузлів  $B_1, B_2, \dots, B_n$ .

Імовірність відмови вузлів складається з  $P(B_1), P(B_2), \dots, P(B_n)$ . Імовірність появи ознаки  $A$  при несправності окремих вузлів є  $P(A/B_i)$ . Необхідно визначити імовірність  $P(B_i/A)$  пошкодженого вузла  $B_i$  відносно інших, якщо під час експлуатації з'являється подія  $A$ .

Для розв'язання задачі розглядається імовірність одночасної появи ознаки  $A$  і пошкодження (стану)  $B_i$ .

Імовірність одночасної появи ознаки  $A$  та події  $B_i$  визначається за формулою:

$$\begin{aligned} P(A \wedge B) &= P(A) \cdot P(B/A) = P(B) \cdot P(A/B), \\ P(A \wedge B_i) &= P(A) \cdot P(B_i/A) = P(B_i) \cdot P(A/B_i). \end{aligned} \quad (4.6)$$

З урахуванням (4.6) визначається :

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{P(A)}. \quad (4.7)$$

Встановимо, що імовірність події  $A$  є  $P(A)$ . Оскільки ознака  $A$  характеризує пошкодження якогось вузла, то ця подія складається з логічної суми окремих подій

$$A = (A \wedge B_1) \vee (A \wedge B_2) \vee (A \wedge B_3) \vee \dots \vee (A \wedge B_n). \quad (4.8)$$

У зв'язку з припущенням, що може з'явитися тільки одна з можливих подій, отримаємо:

$$P(A) = P(A \wedge B_1) + P(A \wedge B_2) + P(A \wedge B_3) + \dots + P(A \wedge B_n). \quad (4.9)$$

Повна ймовірність події  $A$  визначається з урахуванням (4.6), тобто:

$$\begin{aligned} P(A \wedge B_i) &= P(B_i) \cdot P(A/B_i), \\ P(A) &= \sum_{j=1}^n P(B_j) P(A/B_j). \end{aligned} \quad (4.10)$$



Фізичний принцип (4.10) полягає в тому, що якщо система має декілька можливих несумісних шляхів переходу до іншого стану, то ймовірність переходу дорівнює сумі ймовірностей реалізації кожного з них (несумісні шляхи – такі, що не можуть реалізуватись одночасно).

З урахуванням (4.7) та (4.10) отримаємо формулу Баєса:

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j)P(A/B_j)} \quad \text{– формула Баєса.} \quad (4.11)$$

Знаменник рівняння (4.11) визначає суму добутку тих самих величин, але для всіх вузлів [3].

Розглянемо на прикладах практичне використання формули Баєса.

*Приклад 1.* Імовірність безвідмовної роботи елемента  $P = 0,9$ . Визначити надійність ( $R$  – reliability) блоків при послідовному та паралельному з'єднанні елементів.

*Розв'язання:*

а) логічний добуток подій  $A, B, C$  (блок працює, якщо всі елементи працюють):

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \wedge B \wedge C) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C), \\ P(R) &= 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,729; \end{aligned}$$

б) логічна сума подій  $A, B, C$  (блок працює, якщо працює хоча б один елемент):

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \vee B \vee C) = \\ &= P(A) + P(B) + P(C) - P(A \wedge B) - P(B \wedge C) - P(A \wedge B \wedge C). \\ P(R) &= 0,9 + 0,9 + 0,9 - 0,81 - 0,81 - 0,729 = 0,351. \end{aligned}$$

*Приклад 2.* Імовірність безвідмовної роботи авіаційного двигуна  $P = 0,99$ . Якщо літак має два двигуни, то потрібно знайти ймовірність того, що не буде одночасної відмови двох двигунів.

*Розв'язання:*

$A$  – безвідмовна робота першого двигуна (надійність роботи);  
 $B$  – безвідмовна робота другого двигуна (надійність роботи);  
 $R$  – надійність роботи двох двигунів.

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \vee B) = P(A) + P(B) - P(A \wedge B), \\ P(R) &= 0,99 + 0,99 - (0,99 \cdot 0,99) = 0,9999. \end{aligned}$$

Це імовірність того, що буде працювати хоча б один двигун.

Імовірність того, що не буде одночасної відмови двигунів (робота кожного з двигунів – незалежні події) визначається:

$$P(R) = P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) = P(A) \cdot P(B), \\ P(R) = 0,99 \cdot 0,99 = 0,9801.$$

*Приклад 3.* Відомо, що 90% шарикопідшипників виробляють свій ресурс у справному стані. Підвищення температури мастила на 30 % від нормальної зустрічається на практиці тільки в 5 % випадків. Визначити імовірність того, що підшипник справний при підвищенні температури на 30 %.

*Розв'язання:*

$A$  – підвищення температури на 30 % – це ознака;

$B_1$  – підшипник справний;

$B_2$  – підшипник несправний.

за формулою Баєса:

$$P(B_1/A) = \frac{P(B_1)P(A/B_1)}{P(B_1)P(A/B_1) + P(B_2)P(A/B_2)},$$

де  $P(B_1) = 0,9$ ;  $P(A/B_1) = 0,05$ ;  $P(B_2) = 0,1 = (1 - 0,9) = 1 - P(B_1)$ ;

$$P(A/B_2) = 0,95 = (1 - 0,05) = 1 - P(A/B_1).$$

$$P(B_1/A) = \frac{0,9 \cdot 0,05}{0,9 \cdot 0,05 + 0,1 \cdot 0,95} = 0,32,$$

Під час вирішення завдань прогнозування методами *статистичної класифікації* (розпізнавання образів) відомі значення параметра у певні моменти часу, які зараховують до одного з класів (еталону). Після врахування закономірності зміни параметрів аналізується зміна певного параметру у майбутньому. При цьому розподіл значень параметрів на класи може бути часовим (за часом або напруцюванням) або параметричним (за величинами контрольованих параметрів).

### **Контрольні питання**

1. Що встановлює теорія надійності та з яких компонентів вона складається?
2. Предмет та об'єкт надійності. Дайте визначення.
3. Які існують методи прогнозування надійності?
4. Проаналізувати етапи та задачі надійності.
5. У чому полягає принцип прогнозування технічного стану електромехатронних систем?
6. Обґрунтувати поняття залишкового ресурсу елементів систем і агрегатів.
7. У чому полягає особливість використання коефіцієнту технічного ресурсу?
8. Що становить поняття «подія» і як воно використовується на практиці?
9. Проаналізувати та обґрунтувати використання формули Баєса.
10. Перелічити головні параметри формули Баєса.

## 5 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ РУХОМОГО СКЛАДУ

### 5.1 Технічні засоби діагностики

Засоби, за допомогою яких здійснюється діагностування технічного стану об'єкта, називаються технічними засобами діагностування [7,8]. Діагностування може виконувати оператор – людина, контролер, наладчик. Вибір і розробка засобів технічного діагностування здійснюється відповідно до таких факторів:

- наявності серійного випуску систем,
- масовості випуску об'єкта та його складності,
- необхідних якостей діагностичного обладнання (точності, продуктивності, надійності, тощо).

Засоби технічної діагностики створюються одночасно з об'єктом.

Для складних об'єктів істотними стають проблеми підвищення контролепридатності.

*Контролепридатність* – властивість об'єкта, що характеризує його пристосованість до проведення контролю заданими засобами. Рівень контролепридатності об'єктів визначає ступінь ефективності вирішення завдань технічного діагностування та впливає на продуктивність процесу виробництва та якість. У процесі експлуатації рівень контролепридатності визначає коефіцієнт готовності ( $K_g$ ) та витрати, що зумовлені ремонтом.

*Коефіцієнт готовності* – показник надійності ремонтованих об'єктів, що характеризує ймовірність працездатності об'єкта у довільно обраний момент часу в проміжках між виконаннями планового технічного обслуговування.

$$K_g = \frac{T}{T + T_{vp}}, \quad (5.1)$$

де  $T$  – напрацювання на відмову;

$T_{vp}$  – середній час відновлення працездатності.

Контролепридатність забезпечується шляхом перетворення структури об'єкта, що перевіряється до вигляду, зручного для проведення діагностування. Для цього в об'єкт ще на етапі його проектування та конструювання вводять додаткові елементи (апаратуру) – вбудовані засоби тестового діагностування. Серед вбудованих засобів тестового діагностування можна виокремити:

- додаткові контрольні точки;

- додаткові входи для блокування сигналів і завдання необхідних значень сигналів;

- апаратні засоби, які під час діагностики змінюють структуру об'єкта;

- апаратні засоби, які генерують тести й аналізують результати.

Технічні засоби для діагностики (далі – ТЗД) складного автоматизованого технологічного обладнання залежно від призначення поділяються на вбудовані й зовнішні.

*Зовнішні системи* діагностики бути мобільними та стаціонарними.

*Мобільні засоби* (пристрої) призначені для контролю параметрів і діагностування об'єктів під час приймально-здавальних випробувань, та під час експлуатації та ремонту.

*Стаціонарні* (стенди) використовуються переважно для дослідження та випробування об'єктів у процесі їх створення. Під час розробки та використання ТЗД забезпечується метрологічне обслуговування засобів, що включають перевірки (атестацію), юстирування та їх ремонт.

*Юстування* (від нім. *Justieren* – вивіряти, регулювати, від лат. *Justus* – правильний) – сукупність операцій із доведенням похибок засобів вимірювань, приладів, механізмів до значень, що відповідають технічним вимогам.

Функціональна діяльність ТЗД полягає у визначенні пошкоджень із заданою імовірністю, і реєстрації та прийняття рішення про відповідність або невідповідність поточного технічного стану контрольованого обладнання номінальному значенню. Найчастіше ТЗД використовуються для реалізації таких методів діагностування:

- метод тимчасових інтервалів;
- метод контрольних осцилограм;
- метод контролю параметрів.

*Метод тимчасових інтервалів* спрямований на контроль часу циклу роботи системи автоматизації, а також його окремих складників.

*Метод контрольних (еталонних) осцилограм* застосовується для діагностування складних систем автоматизації. Метод заснований на використанні графіків функцій різних параметрів у часі, на підставі аналізу яких робиться висновок про працездатність і технічний стан системи та її окремих елементів.

*Метод контролю параметрів* зводиться до визначення (виміру) тих або інших параметрів, перебування яких визначає працездатність системи або її окремих елементів у встановлених межах.

## 5.2 Сучасне обладнання діагностики транспортних засобів

Ефективність технічного діагностування рухомого складу забезпечується за допомогою пристосованості конструкції вузлів і агрегатів до діагностичного обстеження. Засоби, за допомогою яких здійснюється технічна діагностика, доцільно проектувати паралельно з розробкою конструкцій мехатронних пристроїв.

Засобами технічної діагностики є комплекс контрольних і вимірювальних приладів, а також інструментів, стендів, що забезпечують збір достатньої інформації про технічний стан контролюваного вузла або агрегату.

Розглянемо особливості роботи стендів на прикладі діагностування елементів автомобільного транспорту.

Для контрольно-діагностичного обстеження механічного обладнання транспортних засобів використовуються стенди:

- силового типу з біговими барабанами та балансирним підвішеним пристроєм навантаження (рис. 5.1, а);

- інерційний із біговими барабанами й маховиками, що імітують силу інерції поступально рухомої маси пристрою (рис. 5.1, б).

Стенди, що виконані за схемами на рисунку 5.1, дають змогу контролювати потужність і силу тяги, а також втрати в агрегатах трансмісії.

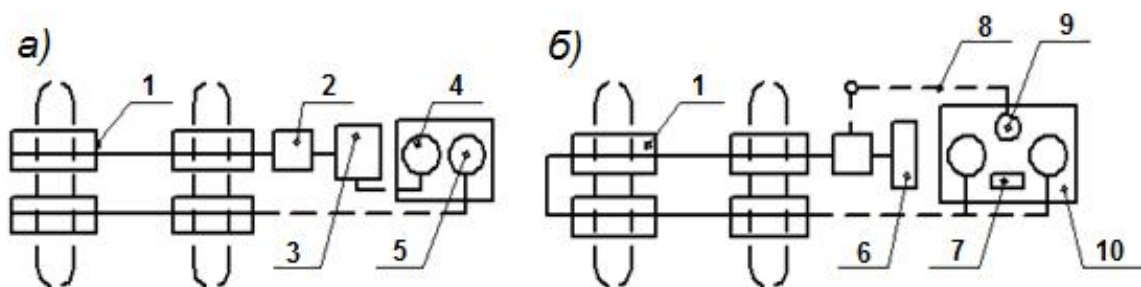


Рисунок 5.1 – Принципові схеми стендів  
силового типу (а) та інерційного (б):

- 1 – бігові барабани; 2 – редуктор; 3 – балансирно-підвішений (гідравлічний, електричний або індукторний) пристрій навантаження; 4 – вимірник сили тяги; 5 – вимірник швидкості; 6 – інерційні маси (маховик); 7 – вимірник шляху (часу) роботи на пускових позиціях; 8 – вимірник прискорення бігових барабанів; 9 – вимірник реактивного моменту; 10 – тахометр для виміру частоти обертання бігових барабанів

За допомогою стендів, виконаних за схемами на рисунку 5.2, можна вимірювати осьовий зсув майданчика, барабана або валика під дією бічних сил і контролювати правильність установлення керованих коліс.

З цією метою застосовують і оптичний стенд із дзеркальними відбивачами й оптико-електричними приладами, що укріплюються на колесах відомого моста та проектують кути установки коліс на екрани.

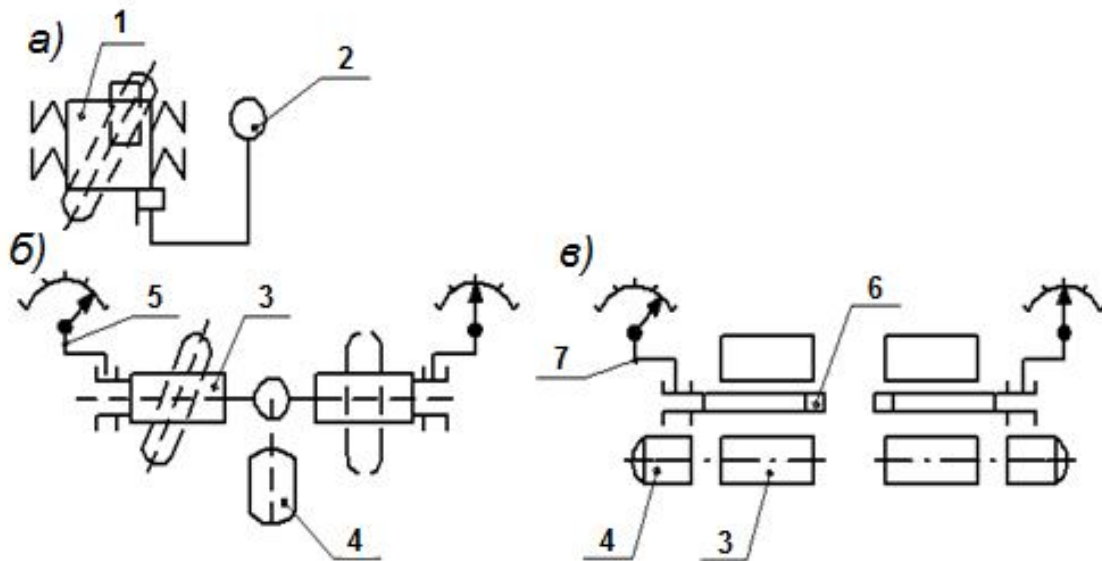


Рисунок 5.2 – Принципові схеми стендів для контролю правильності установки керованих коліс: а – із двома майданчиками;

б – із двома біговими барабанами; в – з контактним валиком;

1 – плаваючі майданчики; 2 – вимірник бічної сили; 3 – бігові барабани;

4 – електричний привід; 5 – вимірник бічного зсуву барабанів;

6 – контактний валик; 7 – вимірник осьових зсувів валика

Стенди, схеми яких наведені на рисунку 5.3, використовуються для визначення гальмівного моменту, гальмівних сил, кутового уповільнення або реактивного моменту, що виникає під час гальмування [7, 8, 10].

Засоби технічної діагностики, що відповідають вимогам, визначаються експлуатаційними підприємствами, які контролюють головні параметри, що характеризують працездатність вузла або агрегата. Програма діагностування обмежується межами експлуатаційної необхідності та складається у такий спосіб, щоб уникнути значної кількості підключень апаратів, приладів і механізмів. Трудомісткість діагностичного обстеження знижується завдяки автоматичному перемиканню, та їх програмуванню. Результати (інформація) технічного діагнозу отримуються у фіксованому вигляді (картограм, таблограм тощо).

Діагностування транспортних засобів може бути загальним або по елементним за всіма головними параметрами.

Залежно від поставленої мети застосовується також інша форма діагностичного обслуговування – спеціалізовані пости, що розташовані

(окремо або вбудовані в потокову лінію) по об'єктах або комплексні станції для загального обстеження.

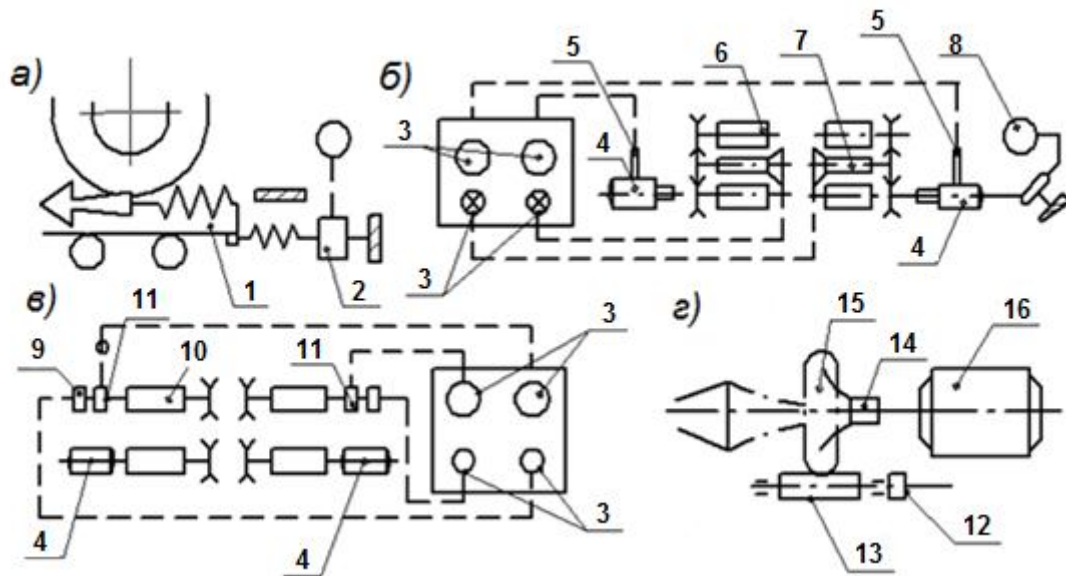


Рисунок 5.3 – Принципові схеми стендів для визначення параметрів процесу гальмування: а – майданчики стендів; б – роликовий силовий пристрій; в – гальмівний пристрій із біговими барабанами; г – гальмівний пристрій колеса;

1 – платформа; 2 – вимірник переміщень; 3 – вимірник гальмівних сил; 4 – електричний привід барабанів; 5 – давач інформації; 6 – бігові барабани; 7 – контактні валики; 8 – вимірник тиску на педаль гальма; 9 – маховики, що імітують поступальну ходу маси тролейбуса при гальмуванні; 10 – гальмівні барабани; 11 – вимірник реактивної сили; 12 – вимірник шляху гальмування; 13 – що підтримує барабан; 14 – приводний пристрій; 15 – колесо тролейбуса; 16 – електродвигун

Перспективними є бортові системи технічної діагностики, які розташовані в кабіні транспортного засобу. При цьому водій може одержувати інформацію про ресурс працездатності вузлів і агрегатів керованої ним одиниці рухомого складу.

### 5.3 Види діагностики технічних засобів і їхні параметри

Якість мехатронних систем визначається сукупністю властивостей, що обумовлюють придатність та задовольняють певні потреби відповідно до їхнього призначення [6–8]. Одним із показників якості систем є показник надійності як безвідмовності, довговічності, зберігання, ремонтпридатності.

Найважливіші принципи, методи та засоби забезпечення надійності:  
– вибір, удосконалення та створення нових матеріалів;



- пошук і реалізація нових фізичних принципів роботи систем автоматизації;
- реалізація нових видів енергії та засобів її перетворення;
- створення захисних умов застосування систем в умовах важких зовнішніх впливів;
- удосконалення технологій виробництва;
- застосування різних видів резервування та надмірності;
- реалізація заходів, що підвищують ефективність отримання, обробки й використання інформації (застосування захисних і перешкодозахисних кодів, розробка якісного математичного забезпечення).

Під час визначення надійності роботи системи використовують поняття:

*резервування* (від лат. *reservo* – зберігаю) – метод підвищення надійності системи шляхом застосування структурної, функціональної, інформаційної та тимчасової надмірності стосовно мінімально необхідної та достатньої для виконання системою заданих функцій;

*надмірність* – наявність у системи можливостей понад мінімально необхідних для нормального функціонування. Під час діагностики систем необхідно вирішити питання визначення технічного стану об'єкта шляхом визначення працездатності, правильності функціонування на всіх етапах експлуатації систем.

Технічні основи надійності та діагностування пов'язані між собою та закладаються на стадії проектування та подальшого виробництва та експлуатації.

На цей час ідеальна повнота виявлення та глибина пошуку дефектів систем виявляється сучасними засобами шляхом використання діагностичних методів моделювання поведінки системи, як у справному стані, так і за наявністю дефектів.

Широко застосовується *тестове діагностування*, яке має сукупність і послідовність входних впливів.

*Тест* (англ. *test* – проба, випробування, дослідження) – це завдання з відомим розв'язанням, що призначене для перевірки якості системи.

Перевіряючі тести призначені для перевірки справності або працездатності об'єкта. Тести пошуку дефектів призначені для визначення місця і, можливо, причин дефектів, що порушують справність і працездатність об'єкта діагностування.

Для дискретних об'єктів тести (їхні алгоритми) будуються за структурними або за функціональними моделями. Тести можуть бути як строго визначеними (детермінованими), так і імовірнісними.

Засоби тестового діагностування містять дві головні частини – генератор тестових впливів і аналізатор відповідей об'єкта на тестовий вплив .

Генератор і аналізатор функціонально та конструктивно окремі один від одного. Генератор зберігає та створює (генерує) тести й подає їх на об'єкт діагностування. Аналізатор зберігає отримані відповіді, порівнює фактичні відповіді з очікуваними та видає результат – діагноз.

Іноді аналізатор становить сукупність еталона (справна копія об'єкта) і схему порівняння. Також нерідко частина функцій генератора й аналізатора покладається на людину.

Сучасним методом визначення параметрів та стану об'єкта є *функціональне діагностування*, яке здійснюється як безперервно, так і періодично або епізодично.

У разі використання функціонального діагностування визначаються:

- конкретні функції та умови застосування об'єкта, а також його працездатність під час експлуатації;
- типи та переліки дефектів, що підлягають виявленню під час діагностування;
- розподіл завдань діагностики за періодами життєвого циклу об'єкта;
- алгоритм функціонального діагностування та його види;
- глибину функціонального діагностування;
- склад обладнання (апаратний, програмний, автоматичний або ручний, спеціалізований або універсальний, зовнішній або вбудований тощо) функціональної діагностики.

Для формування алгоритмів систем функціонального діагностування (далі – СДФ) використовуються математичні моделі як самого об'єкта, так і його пошкоджень. Установлюється зв'язок між ступенем розвитку пошкоджень і дефектів та поведінкою вимірюваних параметрів.

#### **5.4 Автоматизовані діагностичні системи**

У промисловості широко й успішно застосовуються автоматизовані електроприводи з програмним керуванням. Сучасне виробництво висуває до них необхідні вимоги, що пов'язані з надійністю їхньої роботи. Наявність таких приводів дає змогу використовувати переваги

промисловості й виконувати нові завдання, а також створювати ефективні технологічні машини й успішно автоматизувати різноманітні технологічні процеси.

Розглянемо приклад використання автоматизованих систем із використанням сучасних технологій.

Існує кілька типів комплектних електропневматичних позиційних і приводів, призначених для застосування в різноманітних галузях промисловості та створених на базі сучасних принципів мехатроніки. Такі приводи відрізняються компактністю, механічною міцністю, високою надійністю й великим ресурсом, здатні працювати в жорстких умовах експлуатації, володіють хімічною стійкістю. Ці властивості досягнуті внаслідок ретельного підбору й органічного поєднання прецизійних пневмомеханічних і мікроконтролерних елементів, застосування сучасних інформаційних і обчислювальних технологій і методів автоматичного управління. Безперечними перевагами пропонованих мехатронних приводів є висока гнучкість комп'ютерного управління рухом і здатність забезпечити ефективну інтеграцію приводів у складні автоматично діючі технологічні системи.

Для жорстких умов експлуатації застосовуються позиційні приводи з пристроями дистанційного керування. Вони виконані на основі високотехнологічних і надійних пневмоциліндрів, що відповідають вимогам стандартів DIN/ISO 6431 (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Електропневматичні позиційні приводи з пристроями дистанційного керування

На циліндрі розташований прецизійний давач положення та первинний перетворювач вихідного сигналу у сигнал струмової петлі 4–20 мА. Це дає змогу підвищити перешкодозахищеність і спростити інтеграцію приводів в АСУ ТП.

Управління рухом поршня організовано за принципом зворотного зв'язку, і приводом є система, що відстежує. Реалізацію алгоритму управління покладено на мікроконтролер, який виконує кілька функцій (рис. 5.6).

Мікроконтролер задає вплив, що несе інформацію про бажаний стан поршня, опитує давач положення, обчислює неузгодженість, у функції від цієї неузгодженості формує команди на електропневматичний регулювальний пристрій приводу та видає дані про стан приводу на пристрій управління вищого рангу та на пристрій цифрової індикації. Залежно від необхідної точності й швидкодії як електропневматичний регулювальний пристрій може виступати п'ятиканальний трипозиційний електропневматичний розподільник дискретної дії із закритою центральною позицією, група клапанів або пропорційні електропневматичні пристрої. Команди контролера перемикають регулювальний пристрій у такий спосіб, що поршень завжди рухається в бік зменшення неузгодженості [6–8].

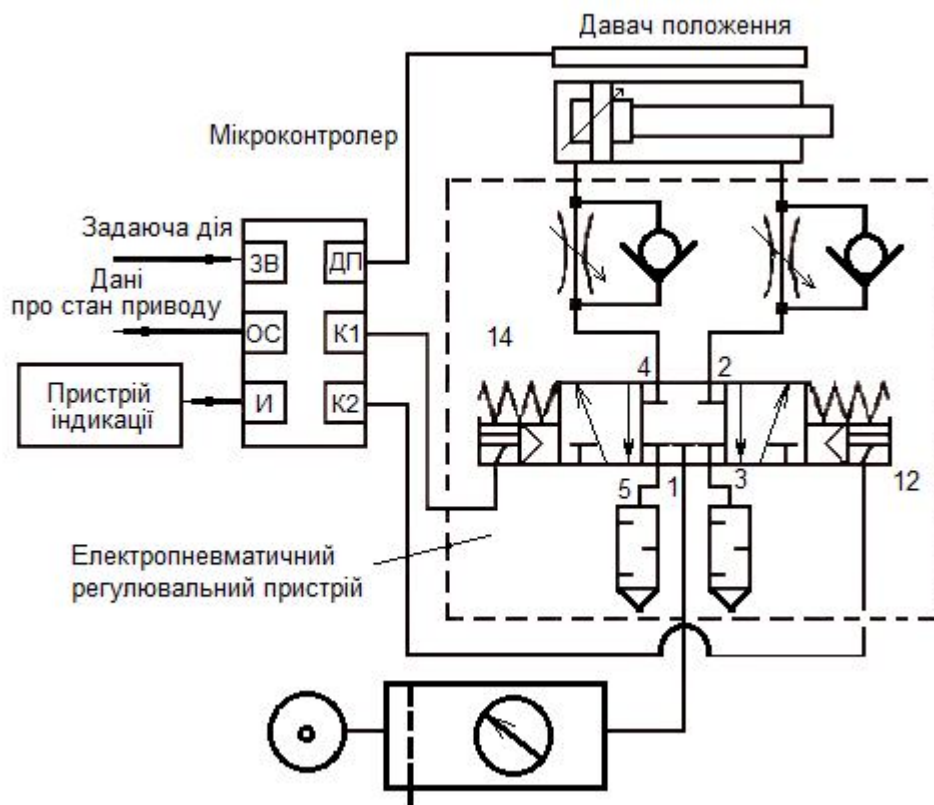


Рисунок 5.6 – Схема електропневматичного відстежувального приводу

Після досягнення необхідного положення поршня розподільник перемикається у центральну позицію, що призводить до зупинки штока пневмоциліндра.

Великий досвід промислової експлуатації позиційних і відстежувальних приводів свідчить про те, що найвдалішими виявляються безконтактні давачі, дія яких заснована на магнітострикційному ефекті й магнітних зв'язків вимірювального елемента давача з магнітом на поршні.

Для забезпечення високого ступеня захисту від дії несприятливих чинників навколишнього середовища мікропроцесорні та приводні системи керування та відображення інформації розміщаються в окремій шафі (рис. 5.7).

Наявні мікропроцесорні пристрої керування забезпечують інтеграцію приводу або групи приводів до складу єдиної системи управління технологічними процесами, діагностику та віддалений моніторинг стану приводу.

При цьому контролюються стан приводу, параметри значення впливу й похибки позиціонування, які для зручності використання та налаштування виводяться на цифровий індикатор чи інший засіб візуалізації даних.



Рисунок 5.7 – Шафа для керування електроприводами

Можливість ефективного застосування електроприводів у складних технологічних системах підтверджена великим позитивним досвідом їх промислової експлуатації. Це дає змогу впевнено рекомендувати такі приводи для широкого використання в новостворених і модернізованих системах автоматизації.

Нові технологічні рішення у сфері автоматизації значно спрощують і прискорюють розробку промислових систем керування.

З використанням автоматизованої системи управління технологічними процесами (далі – АСУТП) створюється ієрархічне керування виробництвом, транспортом, енергетичними явищами, яке має сучасне обладнання й об'єднується з системами типу SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) або DCS (Distributed Control Systems).

Технічні вимоги до сучасних підсистем АСУТП [2–5]:

- вибір оптимального обладнання, з точки зору ефективності та надійності, компактності й захищеності від зовнішніх чинників, що задовольняє міжнародним стандартам;
- забезпечення широкого температурного діапазону роботи технічних засобів локальних систем автоматичного управління;
- захист контрольно-вимірювальних та інформаційних каналів від зовнішніх впливів, а також посилення сигналів, що передаються;
- підтримка стандартних каналів обміну технологічною інформацією між окремими автоматизованими об'єктами та централізованою системою управління та контролю;
- можливість обміну даними інформаційними каналами у реальному часі;
- забезпечення високоефективного людино-машинного інтерфейсу у системі візуалізації та моніторингу;
- ефективне, з точки зору витрат часу, реконфігурування, налаштування, а також пошук і усунення пошкоджень.

На прикладі створення системи температурного контролю розглянемо головні переваги системи управління та збору даних з використанням Compact RIO і середовища розробки Lab VIEW. Схема системи температурного контролю вентилятора наведена на рисунку 5.8.

Система має контролювальний і керувальний пристрій Compact RIO, який складається з такого:

- контролера реального часу на базі промислового процесора, що підтримує операції з плаваючою точкою. У контролері використовується промисловий процесор класу Pentium із частотою 200 МГц, на якому виконуються програми LabVIEWReal-TimeModule з детермінованим часом виконання операцій. Велика бібліотека функцій, що поставляється з LabVIEW, доступна для ефективної розробки власних багатопоточних контрольно-вимірювальних систем, що працюють у режимі жорсткого реального часу;



– реконфігурованих шасі із вбудованою ПЛІС (програмована логічна інтегральна схема) на один мільйон логічних вентилів. На базі ПЛІС можна розробляти власні схеми управління та збору даних із тактуванням і синхронізацією процесів. ПЛІС з'єднана з усіма модулями введення – виведення, встановленими в шасі, за топологією «зірка», що забезпечує можливість прямого доступу до кожного з них, і дозволяє здійснювати їх гнучку та точну синхронізацію;

– набору модулів введення – виведення різного типу, починаючи від термопарних модулів із діапазоном вимірювання сигналів  $\pm 80$  мВ і закінчуючи 250 VAC/VDC універсальними модулями цифрового введення.

На основі показань датчиків температури та швидкості обертання вентилятора, підсистема подає необхідну (для підтримки заданої температури) напругу живлення на вентилятор.

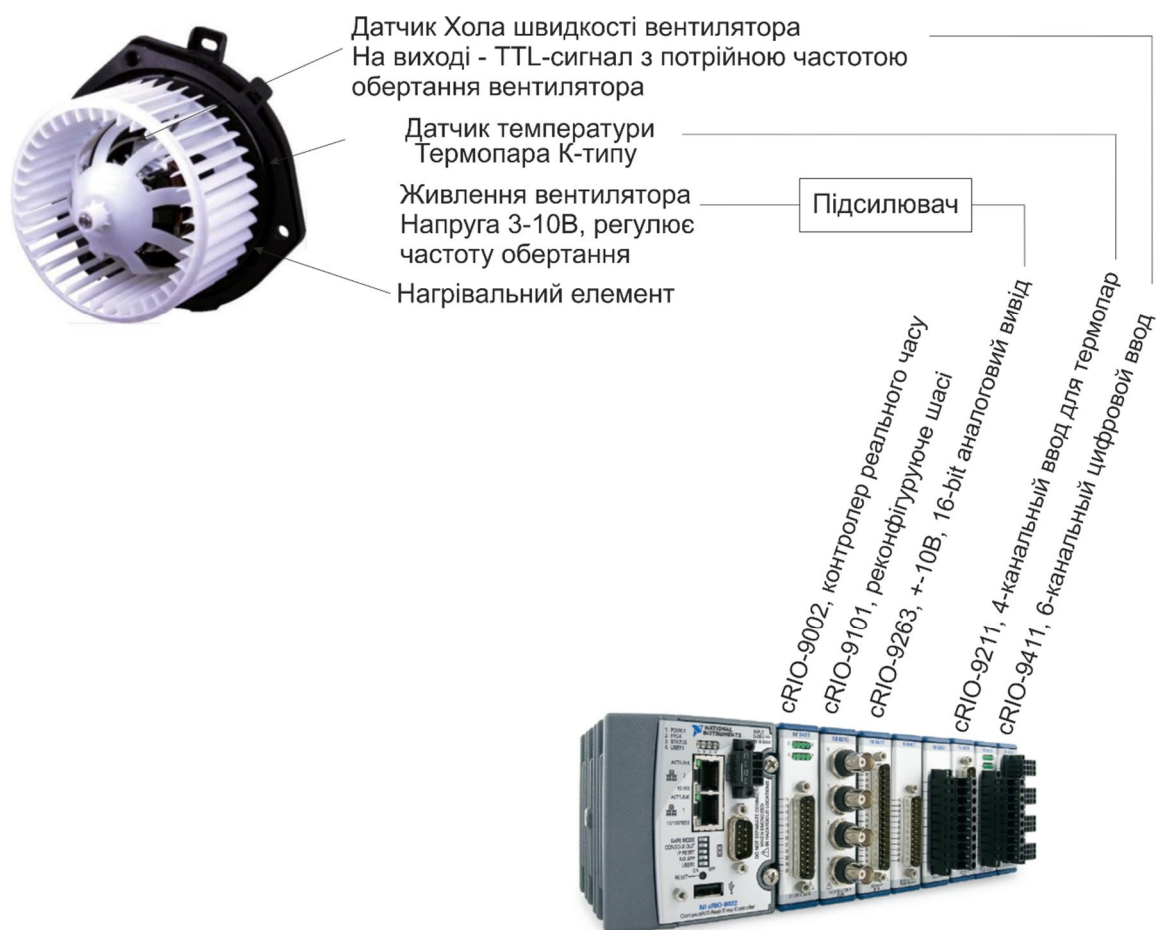


Рисунок 5.8 – Схема системи температурного контролю вентилятора

Завдяки використанню сучасних технологій така система має значні переваги:

– компактне та візуальне відображення інформації, що підключається до CompactRIO за потребою;

- інтеграцію з бездротовими мережами Wi-Fi і Bluetooth із використанням вбудованих можливостей КПК;
- доступність і універсальність обладнання (серійні КПК);
- висока ефективність (із точки зору витрат часу) і відносна простота розробки додатків для КПК із використанням LabVIEWWPDAmodule.

Загалом система використовує три варіанти людино-машинного інтерфейсу (рис. 5.9).

Наприклад, за допомогою програмного забезпечення встановлюється регульований процес нагрівання–охолодження, що становить стандартну систему зі зворотним зв'язком.

Один із найпоширеніших алгоритмів управління такими процесами є система *PID*-регулювання (пропорційно-інтегро-диференційне).

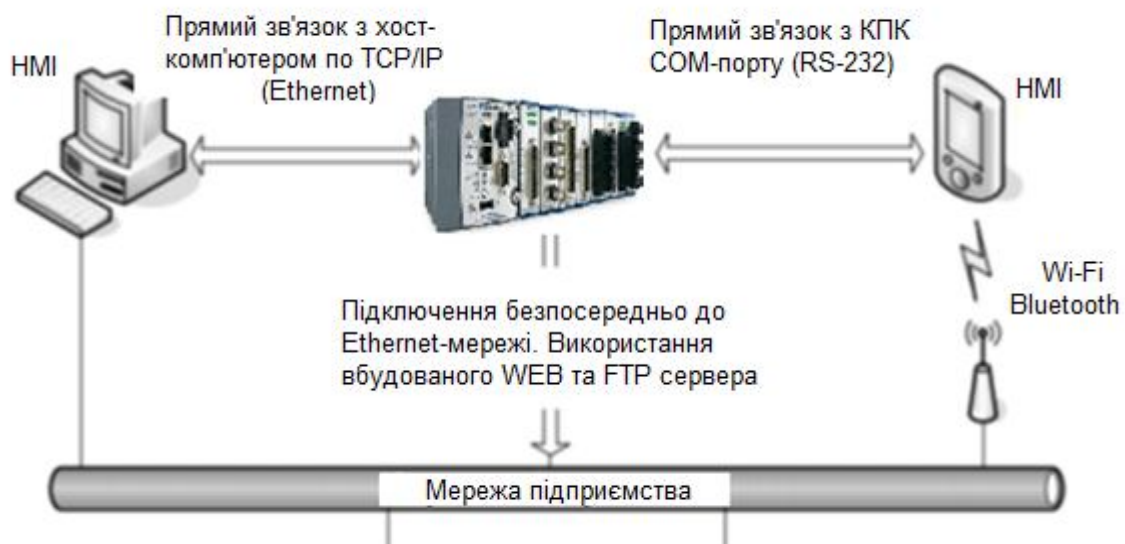


Рисунок 5.9 – Варіанти інтеграції підсистеми

При цьому контролер порівнює виміряну величину із заданою. На основі різниці або «помилки», обчислюється необхідне значення керованого параметра. Враховується також історія процесу та швидкість зміни величини помилки.

Програмна архітектура підсистеми наведена на рисунку 5.10.



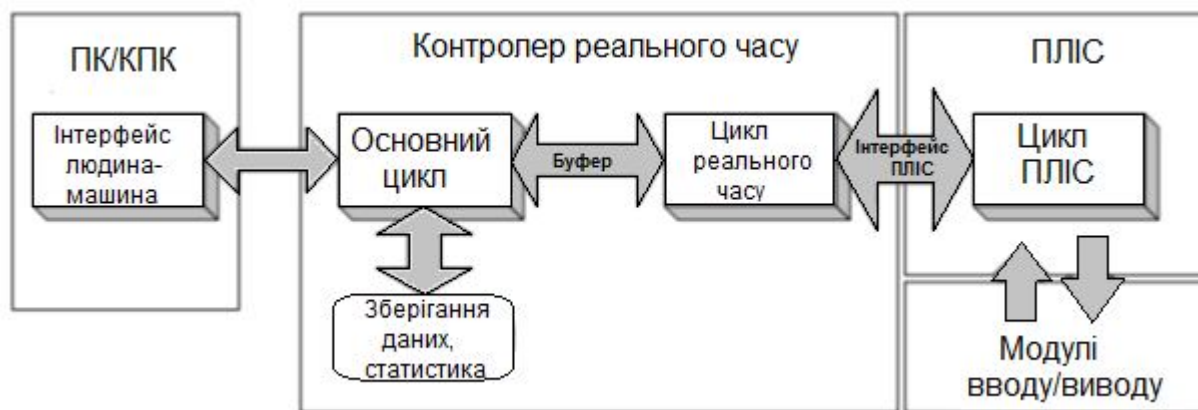


Рисунок 5.10 – Програмна архітектура підсистеми

Керувальний алгоритм системи температурного контролю організований у циклі реального часу (рис. 5.11) і становить двоетапне *PID*-регулювання.

На першому етапі контрольованим параметром є температура нагрівача, а керованим – швидкість обертання вентилятора.

На другому етапі – швидкість обертання вентилятора та напруга на вентиляторі відповідно до рисунка 5.11.

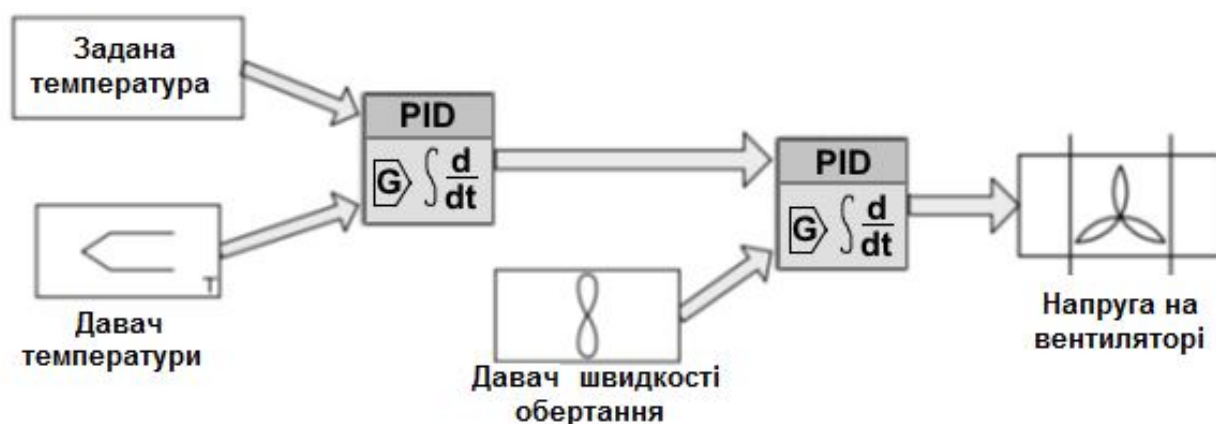


Рисунок 5.11 – Схема керуючого алгоритму

Основний цикл виконує такі функції:

- організація взаємодії з людино-машинними інтерфейсами (із КПК по шині RS-232, із ПК по Ethernet із використанням програми-клієнта на ПК, із ПК через WEB-інтерфейс);
- ведення статистики та її публікація в людино-машинних інтерфейсах, а також у файлах, доступних за FTP;
- надає можливість швидкої та ефективної модифікації інтерфейсної частини програми.

Програмне середовище LabVIEW – ідеальна платформа для додатків мехатроніки, що дає змогу вести розробку проектів на стику таких сфер

інженерних знань, як механіка, електротехніка, електроніка, автоматичне керування та програмування вбудованих систем.

Використання LabVIEW забезпечує підвищення кваліфікації користувача у роботі з середовищем, що дає змогу оперативно й легко впроваджувати інноваційні технології протоколювання даних, бездротових вимірювань, автоматизованого тестування та інших.

LabVIEW також є графічним пакетом. Програми створюються у вигляді графічних діаграм, подібних до звичайних блок-схем.

Значною перевагою LabVIEW є те, що розробнику та користувачеві доступні функціонально ідентичні системи програмування для різних операційних систем, таких як Microsoft Windows 95/98/NT/2000/XP, Linux, MacOS.

Модульні технології обладнання та програмного забезпечення дають змогу із мінімальними витратами розробляти вимірювальні та керувальні системи різної конфігурації та складності (рис. 5.12).

За допомогою моделей отримується інформація про процеси, що відбуваються у системі управління під час вимірювання регульованих параметрів.

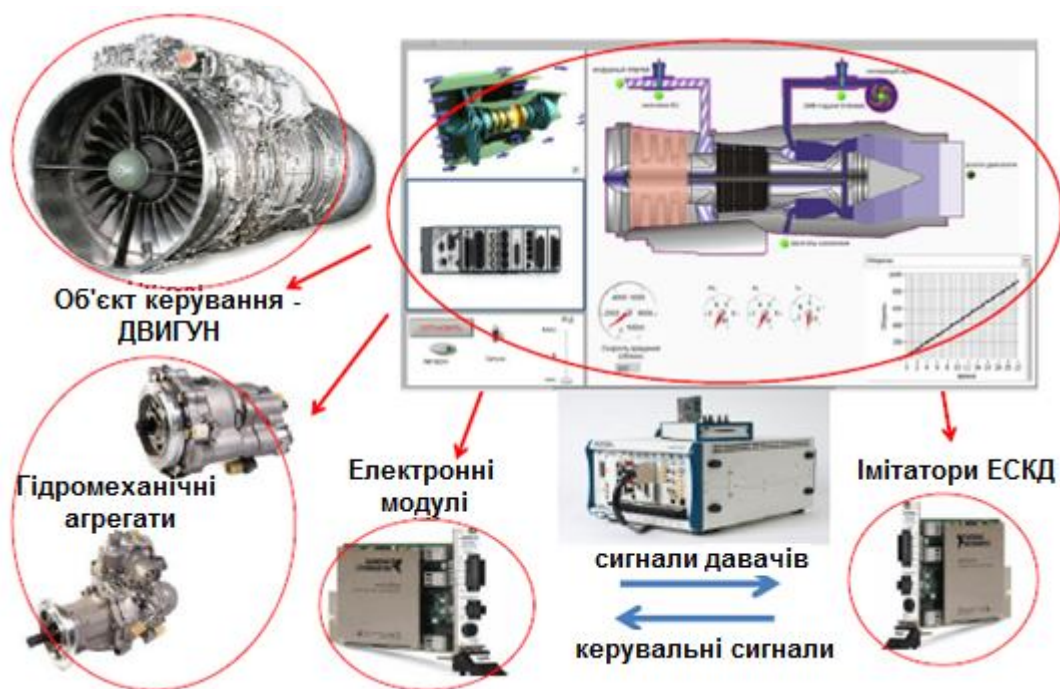


Рисунок 5.12 – Віртуальні моделі систем автоматизованого керування (САК)

За допомогою модульних технологій розробляються роботи та роботизовані системи управління різного призначення та системи керування роботами.

## **Контрольні питання**

1. Фізичні основи прогнозування технічного стану.
2. Який взаємозв'язок діагностики з надійністю та якістю функціонування транспортних засобів автоматизації?
3. Призначення технічних засобів діагностування.
4. Порівняйте тестове та функціональне діагностування.
5. Найчастіше ТЗД використовуються для реалізації яких методів діагностування? Проаналізувати автоматизовані діагностичні системи.
6. Електропневматичні позиційні приводи з пристроями дистанційного керування. Призначення та переваги перед іншими приводами.
7. Проаналізувати роботу системи температурного контролю на основі NI CompactRIO.
8. Класифікація діагностичних параметрів та вимоги до них.
9. Що становить віртуальна модель САК двигуна?

## **6 ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ ТА МОДУЛІ**

### **6.1 Модульні системи електромехатронних комплексів**

Модульні системи електромехатронних комплексів складаються з механічної частини, приводної (переважно електромеханічної) частини, а також системи керування [3, 10–12].

Елементи механічної частини:

- робочий орган (лебідка крана, робоче колесо насоса, фреза металорізального верстата), що виконує корисну механічну роботу (переміщення вантажу, механічна обробка деталі тощо);
- механічна передача, яка передає швидкість руху або його характер (поступальний замість обертового) іншій системі.

Завданням приводної частини (електроприводу) є перетворення електричної енергії в механічну та приведення в рух робочих органів електромеханічних елементів.

Електромеханічна приводна частина складається з електричного двигуна й електронного силового перетворювача, що перетворює електроенергію, яка споживається зі джерела (системи електропостачання) до вигляду, придатного для живлення обмоток двигуна. Саме через цей перетворювач і здійснюється керування швидкістю, зусиллями й положенням валу двигуна і, зрештою, робочого органу.

Останнім часом у побудові електромеханічних комплексів нового покоління спостерігається тенденція передачі все більшої кількості функцій від механічних вузлів до інтелектуальних (електронних, комп'ютерних, інформаційних). З інтелектуальних функцій складається система керування мехатронним комплексом.

Інтелектуальні вузли комплексу легко перепрограмуються під нове завдання, що розширює його функціональні можливості. Разом з розвитком техніки вузли елементів комплексу мають різне фізичне походження (механічні, електричні, електромеханічні, електронні, інформаційні). Але це не заважає їм поступово об'єднуватися в єдине конструктивне коло.

У основі ключового елементу мехатронних систем є модуль руху, наприклад, який об'єднує в одному комплексі приводний електричний двигун та індустриальний редуктор (рис. 6.1). Це підвищує надійність роботи електричних машин та спрощує їх розробку.

Мініатюризація засобів силової та керувальної електроніки дала можливість конструктивно об'єднати з електромеханічними вузлами ще й електронні. З'явилися інтелектуальні мехатронні модулі (далі – ІММД) у

вигляді двигунів і мотор-редукторів із силовими перетворювачами (перетворювачами частоти) на борту (рис. 6.2).



Рисунок 6.1 – Мотор-редуктори:

1 – електричний двигун; 2 – редуктор; 3 – вихідний вал редуктора

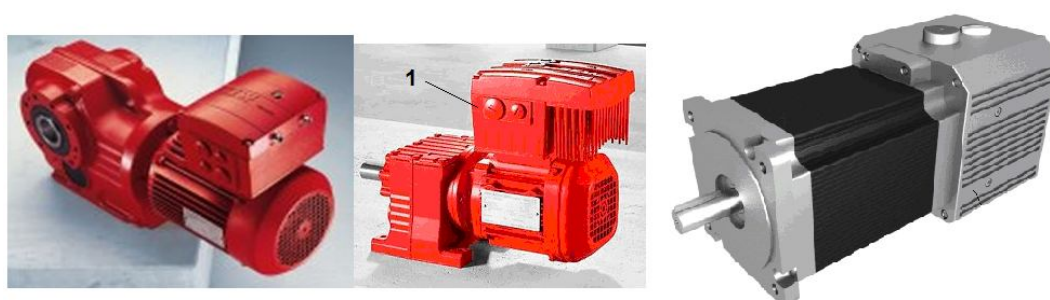


Рисунок 6.2 – Двигуни та мотор-редуктори з вбудованими перетворювачами частоти (1)

Подібні пристрої завдяки наявності в їхньому складі обчислювальних пристроїв здатні автономно виконувати переміщення робочих органів машин без постійного контролю з боку системи автоматизації верхнього рівня.

Значного спрощення механічної частини можна досягти шляхом використання лінійних двигунів замість звичайних двигунів обертального руху (рис. 6.3).



Рисунок 6.3 – Лінійний двигун і базові елементи



Лінійний двигун не має обертових частин. Його рухома частина має обмотку, яка створює магнітне поле. Це магнітне поле відштовхується від нерухомої частини з постійними магнітами, яка грає роль напрямних, і забезпечує поступальне переміщення рухомої частини двигуна.

Для реалізації точних рухів мехатронні модулі також комплектуються давачем положення (енкодером, рис. 6.4, а). Електропривод, обладнаний таким давачем, називають сервоприводом. До складу систем керування рухом, які об'єднують кілька сервоприводів входять контролери керування рухом (сервоконтролери, рис. 6.4, б).



Рисунок 6.4 – Зовнішній вигляд еncoderів (а) і сервоконтролерів (б)

Основні переваги використання інтелектуальних мехатронних модулів у електромеханічних комплексах:

- здатність виконувати складні рухи самостійно, без звернення до контролера верхнього рівня керування, що підвищує автономність модулів, гнучкість і живучість мехатронних систем;
- спрощення комунікації між модулями та центральним пристроєм керування;
- підвищення надійності й безпеки мехатронних систем завдяки комп'ютерній діагностиці пошкоджень автоматичного захисту при аварійних ситуаціях;
- створення на основі IMM розподілених систем автоматизації, яким властиве делегування функцій управління «зверху»/«вниз», а також широке використання мережевих технологій обміну інформацією;
- використання інтелектуальних сенсорів в IMM призводить до підвищення точності вимірювань завдяки первинній обробці інформації, фільтрації шумів тощо.

До головних функцій сервоконтролерів належать координація рухів окремих сервоприводів (мехатронних модулів) і формування для них завдань на переміщення з метою реалізації складних просторових траєкторій руху.

## **6.2 Сучасне керування в електромехатронних модулях і комплексах**

Сучасне керування системами та комплексами базується на роботі мікропроцесорів та мікроконтролерів, які широко застосовуються в енергетиці, транспорті, промисловому виробництві та інших галузях.

Будь-який комп'ютер – це машина для обробки інформації, незалежно від того, яке конкретно завдання він виконує. Центральним елементом комп'ютера є мікропроцесор.

*Мікропроцесор* – це мікроелектронний програмований пристрій, призначений для обробки інформації та керування процесами обміну цією інформацією в складі мікропроцесорної системи (комп'ютера).

Мікропроцесори створюються за допомогою технологій сучасної мікроелектроніки на основі напівпровідникового кристала. Інформація у мікропроцесорні системи передається завдяки електричним імпульсам.

Конструктивно мікропроцесор виконується у вигляді мікросхем які мають пластиковий або керамічний корпус. Всередині корпусу розміщується мініатюрна напівпровідникова підкладка (рис. 6.5).

На цій підкладці лазером «накреслені» всі електронні схеми мікропроцесора. Входи та виходи схеми на підкладці з'єднані з металевими висновками, розташованими з боків або знизу корпусу мікросхеми.

Мікропроцесорні системи загалом універсальні. Вони здатні виконувати широке коло завдань по обробці інформації. А на виконання конкретного завдання мікропроцесор «налаштовують» за допомогою програми (послідовного переліку машинних команд).

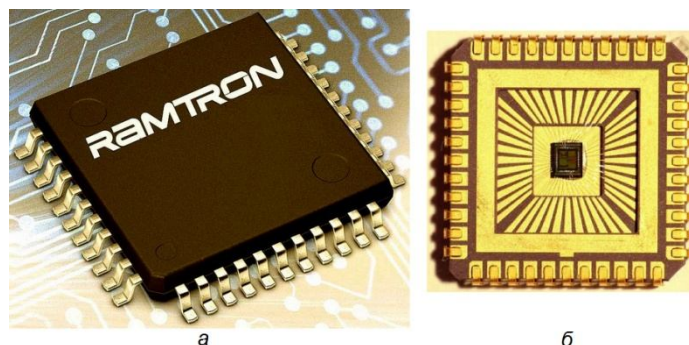


Рисунок 6.5 – Інтегральна мікросхема (а) та її внутрішня будова (б)

Обов'язковими компонентами мікропроцесора є регістри, арифметико-логічний пристрій і блок керування.

Мікропроцесор не може працювати сам по собі. Він є центральною ланкою мікропроцесорної системи, в яку також входять пристрої постійної та оперативної пам'яті, пристрої введення й виведення інформації, накопичувачі на жорстких магнітних дисках (так звані «вінчестери») тощо.

*Мікроконтролер* – це спеціалізований мікроелектронний програмований пристрій. Він призначений для керування системами передачі даних і технологічними процесами.

Мікроконтролери застосовують у різноманітних комплексах та системах, а також у системах транспорту, електропостачання та електроживлення (рис. 6.6).



Рисунок 6.6 – Сфери застосування мікроконтролерів

Мікроконтролер, на відміну від мікропроцесора, зазвичай має невелику розрядність (8–16 біт) і багатий набір команд маніпулювання окремими бітами. Ще одне з основних відмінностей мікроконтролера від мікропроцесора полягає в тому, що в складі мікросхеми контролера присутні всі необхідні елементи для побудови системи керування. У середині мікроконтролера є пам'ять даних (оперативна пам'ять), пам'ять програм (постійна пам'ять), генератор тактових імпульсів, таймери, лічильники, паралельні та послідовні порти. Завдяки цьому система мінімальної конфігурації на основі мікроконтролера може складатися з блоку живлення, безпосередньої мікросхеми контролера й декількох пасивних елементів (резисторів, конденсаторів і кварцового резонатора).



Типова архітектура мікроконтролера (рис. 6.7) містить систему синхронізації та керування (1), арифметико-логічний пристрій (2), регістри загального призначення (3), пам'ять даних (4) і пам'ять програм (5), порти (6), функціональні пристрої (таймери, лічильники, широтно-імпульсні модулятори, інтерфейси) і регістри для їх налаштування (7).

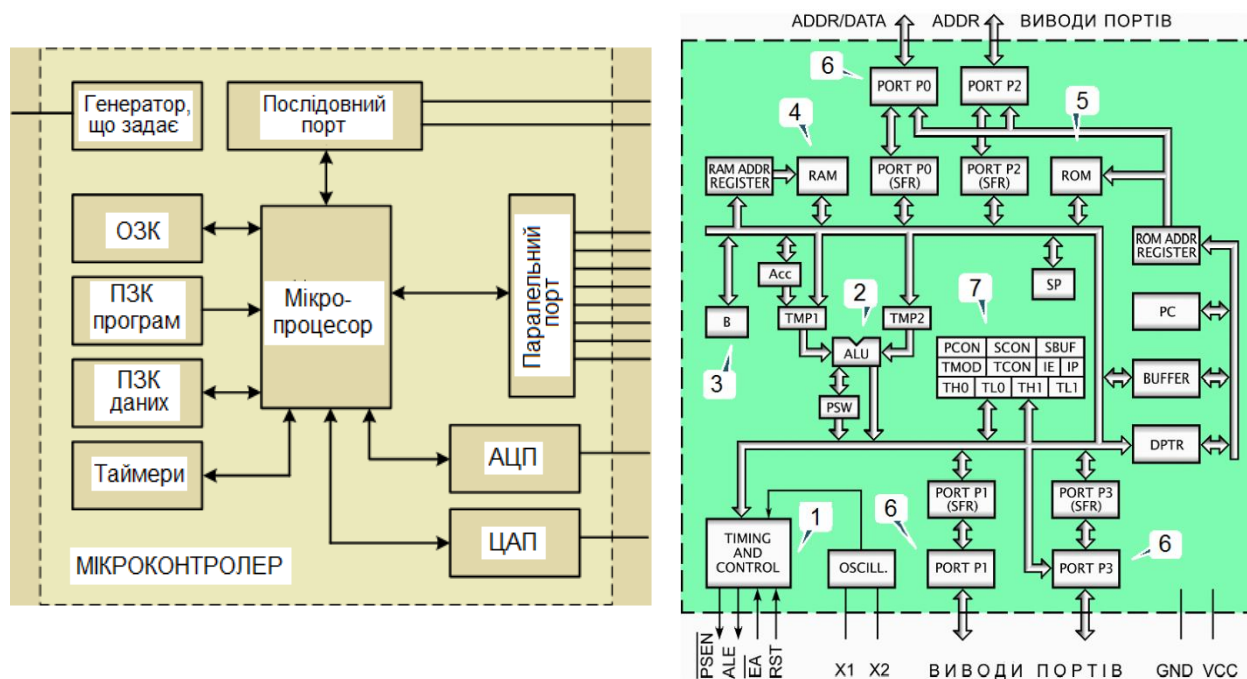


Рисунок 6.7 – Архітектура сучасного типового мікроконтролера

Програми для мікроконтролерів створюють у спеціальних інтегрованих інструментальних середовищах (*Integrated Development Environment*, IDE) мовами асемблера (машинних команд) або C++.

Щорічно в світі продаються мільярди програмованих мікроконтролерів, та мікропроцесорів які мають велику модифікацію та є невід'ємною частиною сучасного технологічного середовища (рис. 6.8).

Апаратна та програмна уніфікація мікроконтролерів та мікропроцесорів дає можливість легко переходити на системи іншого виробника, переносити програми з однієї платформи на іншу. Це підвищує гнучкість процесів автоматизації, сприяє конкурентному інноваційному розвитку світового досвіду.

Крім мікропроцесорів загального призначення та мікроконтролерів на ринку пропонуються так звані сигнальні процесори, спеціально призначені для обробки сигналів у режимі реального часу. Вони використовуються в системах електропостачання, вимірювальних приладах, засобах зв'язку, передачі й відтворення аудіо- та відеопотоків, системах локації та інших.

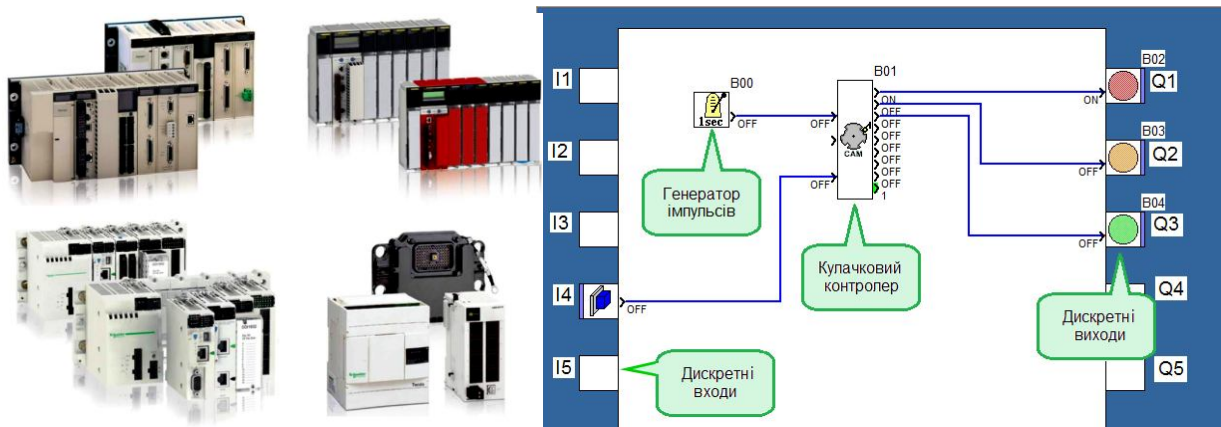


Рисунок 6.8 – Програмовані логічні мікроконтролери та програми

### 6.3 Роботизовані електромехатронні системи та модулі

Сучасною тенденцією проектування та виробництва обладнання є використання блоково-модульного принципу. Для мехатронних систем такими модулями є мехатронні модулі руху – синергетична сукупність механічних (гідромеханічних, пневмомеханічних), електротехнічних, електронних компонентів та інформаційних і програмних засобів, які реалізують досягнення заданого керованого руху. Це дає змогу проводити декомпозицію складних систем, зменшуючи кількість ступенів свободи, та отримати їхню необхідну ієрархічну структуру.

У багатьох сферах техніки мехатронні системи приходять на зміну традиційним електричним та механічним машинам, які вже не відповідають сучасним якісним вимогам. Мехатронний підхід у побудові машин нового покоління полягає в перенесенні функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних, електронних, комп'ютерно- інформаційних компонент, які легко перепрограмовуються під нове завдання та при цьому мають низьку вартість. Наприклад, функціональний аналіз нових виробничих машин доводить, що частка механічної частини на сьогодні скоротилася з 70 % (на початку 90-х років) до 25–30 %. Принципово важливо підкреслити, що мехатронний підхід у проектуванні передбачає не розширення, а саме заміщення функцій, які традиційно виконуються механічними елементами системи, на електронні та комп'ютерні блоки.

Сучасні технологічні та мобільні машини (верстати з ЧПК, автоматичні лінії, промислові роботи тощо) містять декілька мехатронних модулів руху, які здійснюють переміщення в просторі робочих органів та виконавчих механізмів за заздалегідь заданою програмою траєкторією.

Характеристики технологічного середовища визначають за допомогою аналітико-експериментальних досліджень та методів комп'ютерного моделювання. Якщо для проведення таких досліджень потрібні складні та дорогі пристрої, вимірювальні технології, то доцільно використовувати методи адаптивного керування, які дають змогу автоматично корегувати закони руху робочих органів безпосередньо у процесі виконання операції за допомогою зовнішніх сенсорів інформаційної системи машини.

На цей час широко застосовуються технологічні машини – *гексаподи* (рис. 6.9), які використовуються у енергетичній та транспортній галузях для діагностики й обслуговування ліній електропередач та контактних мереж міського електротранспорту та систем захисту.

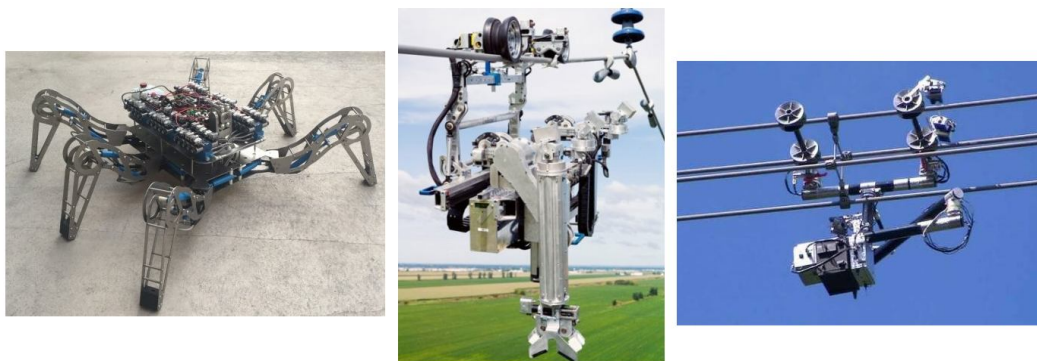


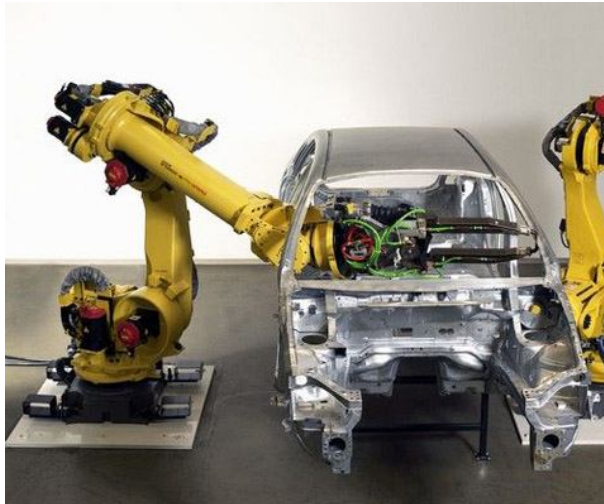
Рисунок 6.9 – Загальний вигляд технологічних машин-гексаподів

Такі гексаподи також можуть становити обробні верстати, координатно-вимірювальні машини. В основі їхньої конструктивної схеми знаходиться платформа Г'ю-Стюарта. Особливістю таких машин є механізм, який має шість незалежних ніг на шарнірних з'єднаннях. Довжину ніг можна змінювати, що приводить до зміни орієнтації платформи.

Синтез нових прецизійних, інформаційних і вимірювальних наукомістких технологій дає основу для проектування та виготовлення інтелектуальних мехатронних модулів і систем. Надалі мехатронні машини й системи будуть об'єднуватися в мехатронні комплекси на базі єдиних інтеграційних платформ.

Мета створення таких комплексів – домогтися поєднання високої продуктивності й одночасно гнучкості техніко-технологічного середовища за рахунок можливості її реконфігурації. Це дасть змогу забезпечити конкурентоспроможність і високу якість продукції мехатроніки, що випускається на ринках XXI століття.

Яскравим прикладом мехатронної системи є роботи та маніпулятори (рис. 6.10). Вони все частіше використовуються для зварювальних та фарбувальних робіт, збиральних операцій, виготовлення електронних друкованих плат, металообробки, у космічних дослідженнях і навіть у побуті.



а



б

Рисунок 6.10 – Промислові роботи: а – зварювальний; б – пакувальний

Деякі різновиди роботів за конструкцією та призначенням подібні до руки людини. Інші робототехнічні системи створюють автоматичне переміщення вантажів, тому вони виглядають як візки (рис. 6.11).



Рисунок 6.11 – Робочар (автоматичний візок)

Типовою мехатронною системою є верстат із числовим програмним керуванням (далі – ЧПК), який використовують для механічної обробки виробів із металу, деревини, пластмас (рис. 6.12). Роботу модулів руху



координує цифрова система ЧПК, до якої попередньо завантажено програму обробки.

Мехатронні модулі та системи застосовуються також:

- в автомобілебудуванні (наприклад, антиблокувальні системи гальм, системи стабілізації руху автомобіля та автоматичного паркування, автопілоти);
- 3D-принтерах (рис. 6.13);
- нетрадиційних транспортних засобах (електровелосипеди, сегвеї, інвалідні візки, дрони, рис. 6.14);
- офісній техніці (наприклад, копіювальні й факсимільні апарати);
- елементах обчислювальної техніки (принтери, плотери, дисководи);
- технологічних лініях та пакувальних машинах харчової та обробної промисловості;
- поліграфічних машинах;
- побутовій техніці (пральні, швейні, посудомийні та інші машини) і фото- та відеотехніці;
- медичному обладнанні (реабілітаційне, клінічне, сервісне);
- тренажерах для підготовки пілотів і операторів, тощо.



а



б

Рисунок 6.12 – Верстати з ЧПК: а – токарний; б – фрезерувальний

На сьогодні інтелектуальні системи широко експлуатуються в інших країнах і в Україні. Ці системи керування можуть застосовуватися для будь-якого виду транспорту: залізничного, міського електричного, автомобільного, повітряного й водного.

Прикладом іншого інноваційного рішення є застосування електромехатронних систем в атомній енергетиці.

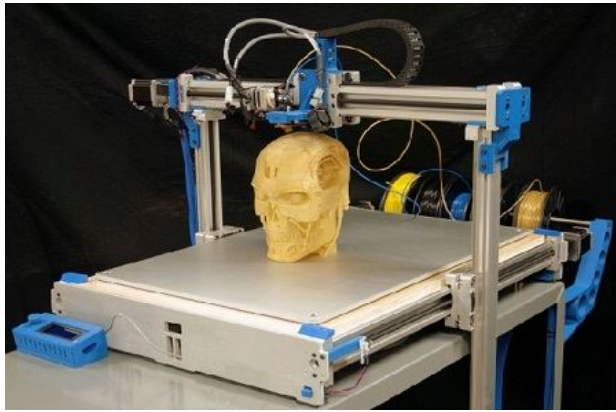


Рисунок 6.13 – 3D-принтер



Рисунок 6.14 – Дрон

До таких комплексів або систем належать роботи у радіаційній розвідці. Як доводить досвід проведення радіаційних обстежень, є багато джерел випромінювання які в просторі можуть бути не зафіксовані радіометричними системами. Тому використання стандартних радіометрів є неефективним. У зв'язку з цим для проведення вимірювань можуть застосовуватися роботизовані системи (рис. 6.15) з технологіями колімованої радіометрії.

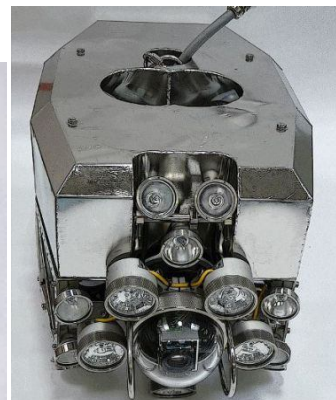


Рисунок 6.15 – Роботизовані мехатронні системи для атомної енергетики

Таких роботів оснащують відкритими та колімованими детекторами, відеокамерами тощо. Відкриті детектори вимірюють потужність дози радіації в точці розміщення вимірювального блоку. Колімований детектор проводить вимірювання потоків випромінювання. Відеокамери, зазвичай, мають оптичне збільшення, що дає змогу докладно розглянути досліджуваний об'єкт.

Роботизовані системи можуть функціонувати в дуже важких умовах: при високих і низьких температурах, обвалах, загазованості, запиленості, радіаційних і електромагнітних полях і тощо.

Роботи можуть виконувати функції і носіїв апаратури для обстеження радіаційно-небезпечних об'єктів. Отже, робототехніка дає змогу проводити максимально ефективну радіаційну розвідку, минаючи перебування людини на об'єкті.

Широко використовуються роботи-ліквідатори наслідків аварій шляхом збору радіаційних проб, очищення будівель від завалів і дезактивації атомних реакторів. Поштовх розвитку світового ринку робототехніки з метою ліквідації наслідків аварій на АЕС надала катастрофа, що сталася на «Фукусіма-1». У цьому випадку використовувалися дистанційно керовані роботизовані системи для виведення з експлуатації атомного реактора з метою зниження високого рівня радіації.

Сьогодні світовий ринок продовжує розвиватися у напрямку створення інтелектуальних мехатронних систем.

### **Контрольні питання**

1. Що таке мехатроніка? Головні завдання мехатроніки.
2. Назвіть принципи синергетики та мехатроніки.
3. Проаналізувати діаграму взаємоперетину різних галузей науки та техніки, на основі яких формується мехатроніка.
4. Роль і місце мехатронних систем у роботі транспортних засобів.
5. Складники мехатронної системи. Функціональне призначення.

## 7 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

### 7.1 Базові положення теорії моделювання

Методи математичного моделювання та проектування мехатронних систем, які розробляються, повинні ґрунтуватися на єдиному, комплексному підході щодо об'єкта проектування [13].

*Моделлю* (від лат. Modulus – зразок, міра) називається пристрій, що володіє основними властивостями досліджуваного об'єкта.

Моделювання як метод дослідження застосовується тоді, коли досліджуваний об'єкт з будь-яких причин частково або повністю недоступний. Така ситуація виникає у разі проектування принципово нової техніки, оскільки для обґрунтування прийнятих проектних рішень необхідно досліджувати систему, поки ще не існуючу фізично.

Моделювання може бути:

- натурним, коли модель має те саме фізичне походження, що і досліджуваний об'єкт;

- аналоговим, коли модель і об'єкт мають різне фізичне походження.

Якщо властивості досліджуваного об'єкта виражені математичними співвідношеннями (рівняннями, нерівностями), то говорять про наявність *математичної моделі*.

Високий рівень розвитку обчислювальної техніки і програмного забезпечення, досягнутий до теперішнього часу, дозволяє розглядати математичне моделювання як потужний інструмент наукових досліджень. Через те що мехатронні системи становлять технічно складні вироби, їх проектування та підготовка до виробництва, а також значення математичного моделювання з використанням комп'ютерів, є визначальним.

Тому система автоматичного проектування (далі – САПР) мехатронних систем обов'язково включає підсистему математичного моделювання динаміки, яка дозволяє в автоматизованому режимі розробляти моделі динаміки проектного виробу, проводити дослідження, вирішувати інженерні задачі оптимізації та синтезу.

У завданнях автоматизації моделювання, дослідження та проектування мехатронних комплексів і систем використовуються такі форми подання математичних моделей динаміки:

- системою диференціальних рівнянь;
- пов'язаних графів;
- структурно-динамічною схемою.



Рівняння динаміки є найзагальнішою формою подання математичної моделі мехатронної системи або її окремих підсистем. Вони становлять рівняння, що пов'язують координати системи, її швидкості та прискорення з діючими на систему силами. Координатами можуть бути не тільки лінійні і кутові положення ланок механічної частини машини, але й обсяги робочої рідини гідроприводу, електричні заряди, що протікають через поперечні перерізи провідників тощо.

Силовими параметрами в рівняннях динаміки мехатронної системи, крім «механічних» сил і їхніх моментів відносно будь-яких осей, можуть бути також тиск робочої рідини (газу), електрична напруга тощо.

Формування рівнянь динаміки електромеханічної системи в узагальнених координатах може бути здійснено методом Лагранжа [36], а також на основі пов'язаного графа системи, шляхом застосування до його вузлів законів Кірхгофа.

Перспективним у задачах моделювання динаміки мехатронних систем є підхід, який полягає в тому, що динаміка виконавчого механізму з декількома ступенями свободи в просторі узагальнених координат представляється як динаміка, що зображає точки у римановому просторі (диференціюються різноманіття, в якому дотичний простір у кожній точці є кінцевомірним евклідовим простором).

Динаміка мехатронних систем та комплексів, зазвичай, описується нелінійними диференціальними рівняннями. Застосування ефективних методів аналізу й синтезу, розроблених у теорії лінійних систем автоматичного керування, передбачає лінеаризацію рівнянь динаміки [13, 41]. Зі свого боку, лінійну модель динаміки системи можна представити у формі структурно-динамічної схеми. Інакше кажучи, у вигляді обмеженого набору лінійних динамічних ланок, об'єднаних у загальну структуру за допомогою прямих і зворотних зв'язків. Комп'ютерний аналіз і синтез систем автоматичного керування, який здійснюється на основі уявлення динаміки систем структурно-динамічними схемами, інтенсивно розвивався з 70-х рр. минулого століття і на сьогодні досить поширений (спеціальні програмні комплекси Simulink, VisSim та інші). Суттєвими результатами, отриманими в цьому напрямку, є пакет програм ПДС (Проектування Динамічних Систем) [19].

Низка завдань проектування мехатронних систем, що мають просторові механізми з великою кількістю ступенів свободи, або управління їх рухом, можна вирішити без складання та інтегрування складної системи рівнянь. При цьому можна обмежитись дослідженням інваріантів механічної частини (робота узагальнених сил на малих

переміщеннях, кінетична енергія) за допомогою тензорно-геометричного методу [13].

## **7.2 Автоматизація моделювання динаміки мехатронної системи**

Одним із напрямів наукових досліджень у мехатроніки є розробка загальних теоретичних положень, на основі яких можливе створення ефективних методів математичного моделювання мехатронних систем і алгоритмів автоматизації моделювання. Оскільки властивості об'єкта керування, виконавчого приводу й інформаційної системи повинні розглядатися в комплексі та враховуватися вже на ранніх стадіях проектування мехатронної системи, необхідно розробляти моделі динаміки як механічних, так і електричних підсистем за допомогою єдиного методу. При цьому метод математичного моделювання динаміки мехатронної системи повинен мати такі властивості [14,15]:

- інваріантністю до фізичної природи об'єктів, що моделюються;
- формальністю дій, які виконуються при реалізації методу;
- зручністю результатів обчислень для аналізу й використання в проектуванні.

Роботи-маніпулятори, мобільні роботи, багатокординатійні верстати з ЧПУ тощо мають просторові виконавчі механізми, які можуть мати велику кількість ступенів свободи й містити замкнуті кінематичні контури. Це ускладнює математичне моделювання динаміки таких мехатронних систем. Багатоступінчасті передавальні механізми приводів, зі свого боку, представляють відомі труднощі при моделюванні динаміки, оскільки в них істотні такі відхилення від ідеальної механічної передачі, як інерційність, пружна піддатливість ланок, люфти та сухе тертя в кінематичних парах. Механічна частина машини в окремих випадках може становити неголономну систему (з наявністю диференційних неінтегрованих зв'язків). Тому метод, покладений в основу алгоритмів автоматизованого формування моделей динаміки мехатронних систем, повинен володіти спільністю, достатньою для обліку всіх перерахованих факторів.

Створення математичних моделей динаміки багатовимірних систем, що складаються з фізично різномірних функціональних частин, становить трудомістке й наукомістке завдання. Для його вирішення в умовах жорстких обмежень часу необхідне ефективне та максимально повне використання можливостей сучасних засобів автоматизації обчислень. До

нових можливостей апаратних і програмних засобів автоматизації обчислень належать:

- висока обчислювальна потужність;
- автоматизація створення просторово-геометричних моделей (комп'ютерна графіка);
- автоматизація математичних обчислень у символьному вигляді (комп'ютерна алгебра);
- розвинені системи обміну інформацією між програмними модулями різного цільового призначення;
- вільний доступ учасників проекту до проміжних результатів проектування, можливість оперативного використання раніше отриманих результатів у розробці нових проектів;
- доступність широкому колу користувачів, візуалізація та анімація модельованих об'єктів і процесів.

Відповідно до завдання, автоматизація моделювання динаміки мехатронної системи полягає:

- в аналізі існуючих методів динаміки й обґрунтуванні вибору методу, на базі якого буде розроблятися математичне забезпечення програмного модуля автоматизованого формування моделі динаміки мехатронної системи;
- у розробці математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення, орієнтованого на можливості сучасних засобів автоматизації обчислень.

### **7.3 Порівняльний аналіз методів динаміки**

На сьогодні відомо п'ять методів отримання рівнянь динаміки багатоланкових виконавчих механізмів [15–17]:

- метод Лагранжа, заснований на рівняннях Лагранжа II роду й описі кінематики системи матрицями однорідних перетворень координат;
- модифікований метод Лагранжа, заснований на рівняннях Лагранжа II роду й рекурентному описі кінематики механічної системи;
- метод Ейлера, заснований на застосуванні другого закону динаміки та принципу Д'Аламбера;
- метод Гауса, заснований на принципі найменшого примушування;
- метод зв'язкових графів.

Метод Лагранжа та метод Ейлера вважаються традиційними та є найчастіше використовуваними на практиці. Висновок рівнянь руху голономних механічних систем методом Лагранжа відрізняється

простотою та єдністю підходу, а самі рівняння, що отримані цим методом, забезпечують опис динаміки й можуть бути використані для розробки законів керування у просторі приєднаних змінних [15]. Вирази для кінетичної та потенційної енергії ланок можна записати відносно координат ланок у нерухомій системі координат. Перевага методу Лагранжа дає змогу застосовувати його для виведення рівнянь руху механічних систем, що містять замкнуті контури. Як вже було зазначено, рівняння динаміки у формі Лагранжа можна скласти для електричної системи. Рівняння та алгоритми динаміки роботів-маніпуляторів, засновані на застосуванні методу Лагранжа [13–17].

Застосування методу Ейлера приводить до системи прямих і зворотних рекурентних рівнянь, послідовно застосованих до ланок механічної системи. Цей метод найефективніший з обчислювальної точки зору, що дає змогу використовувати його для керування системою в реальному часі і для моделювання її рухів на комп'ютері [15]. Перевагою методу Ейлера є також можливість обчислювати сили та моменти сил реакцій у кінематичних парах механізму. З точки зору аналізу, рекурентні співвідношення не є зручними. Тому метод Ейлера практично не застосовується в задачах синтезу законів керування.

Модифікований метод Лагранжа дозволяє отримати рівняння динаміки у векторно-матричній формі, зручній для аналізу. Крім того, ці рівняння забезпечують зниження обчислювальних витрат на розрахунок динамічних коефіцієнтів порівняно з рівняннями Лагранжа. З використанням коефіцієнтів є можливість розрізняти динамічні ефекти, що обумовлені обертальним і поступальним рухом ланок. Це необхідно використовувати під час синтезу керування у просторі станів систем. Обчислювальна ефективність цих рівнянь обумовлена використанням для опису кінематики ланок матриць поворотів і векторів відносного положення. Використання модифікованого методу Лагранжа для аналізу систем, що містять замкнуті кінематичні контури, пов'язане з труднощами, тому що даний метод передбачає рекурентні обчислювальні процедури.

Метод, заснований на принципі Гауса, на відміну від методів, заснованих на рівняннях Лагранжа, дає змогу отримувати рівняння динаміки механічних систем, як з голономними, так і з неголономними зв'язками. При використанні принципу Гауса завдання зводиться до визначення прискорень істинного руху, які забезпечують мінімум виразу для примушування. Це досягається шляхом чисельної мінімізації примушування як функції узагальнених прискорень механічної системи методом динамічного програмування або невизначених множників

Лагранжа. Безсумнівною перевагою методу Гауса можна вважати можливість його застосування для дослідження руху механічних систем із нерегульованими зв'язками. Перевага методу Гауса досягається саме в тих випадках, коли використовуються чисельні методи мінімізації примушування на кожному кроці інтегрування рівнянь динаміки.

Метод зв'язкових графів ґрунтується на поданні системи (механічної, електричної, гідравлічної або комбінованої) у вигляді деякого кінцевого числа елементів, що мають формальний математичний опис і з'єднаних один з одним у загальну структуру за допомогою зв'язків. Цей метод є результатом розвитку теорії графів, одним з основоположників якої був Л. Ейлер.

Математична модель динаміки системи відображається у вигляді схеми (графа), на підставі якої виводяться рівняння динаміки, при цьому механічна частина системи може бути неголономною. Головною перевагою методу зв'язкових графів є структурно-графічне представлення динаміки досліджуваних систем, що дає змогу простежити всі взаємовпливи елементів системи візуально й отримати рівняння динаміки шляхом застосування до зв'язкового графу простих законів Кірхгофа. Використання методу зв'язкових графів дає найбільший ефект при описі, аналізі та проектуванні розгалужених систем з наявністю замкнених кінематичних контурів.

Результати порівняльного аналізу (табл. 7.1) свідчать про те, що найперспективнішим з точки зору автоматизації моделювання динаміки мехатронних систем є метод зв'язкових графів. Цей метод, з одного боку, має найбільшу спільність і необхідну інваріантність до фізичної природи об'єктів дослідження.

Таблиця 7.1 – Порівняльний аналіз методів динаміки

Метод	Механічні системи			Електричні системи	Результат обчислень		
	голономні	неголономні	із замкненими контурами		замкнена система диференційного рівняння	рекурентне рівняння	числений
Лагранжа	+	–	+	+	+	–	–
модифікований			–				
Ейлера	+	–	–	–	–	+	–
Гауса	+	+	+	–	–	–	+
зв'язкових графів	+	+	+	+	+	–	–

З іншого боку, результатом його застосування є не тільки замкнута система диференціальних рівнянь динаміки, а й зв'язковий граф досліджуваної системи. Це розширює можливості інженерного аналізу й автоматизації моделювання динаміки з використанням комп'ютерів.

Отже, метод зв'язкових графів прийнятий в якості теоретичної основи рівнянь і алгоритмів автоматизованого моделювання динаміки мехатронних систем.

#### 7.4 Метод зв'язкових графів

Динамічні властивості технічної системи, що визначають характер процесів, можуть бути подані у вигляді графа, на якому зв'язки між елементами системи відображаються у вигляді ліній або стрілок. Метод отримання рівнянь динаміки системи шляхом застосування закону збереження до вузлових точок її графа, називається методом зв'язкових графів. Цей метод успішно застосовувався в задачах математичного моделювання динаміки різних технічних систем [17–18].

В основу методу зв'язкових графів покладено системний підхід щодо опису динаміки. Досліджуваний об'єкт розглядається у вигляді сукупності пов'язаних між собою у загальну структуру елементів, що функціонують як єдине ціле.

Динамічна система має входи та виходи, через які здійснюється обмін енергією з елементами ширшої системи, до складу якої входить розглянута система. Наприклад, виконавчий привод робота отримує енергію від джерела живлення, перетворює її та поставляє на вхідні ланки механізмів робота. Отже, привод розглядається як підсистема робота. При цьому певна частина енергії живлення перетворюється приводом у теплову енергію і розсіюється. Зі свого боку, робот також є підсистемою, яка взаємодіє з іншими одиницями технологічного обладнання і тощо.

Принципово важливо, що досліджувана динамічна система не розглядається поза зв'язком з елементами більш ширшої системи, тобто не є ізольованою.

Стан кожного елемента у фіксованій момент часу руху системи характеризується двома параметрами: величиною  $e$  (від англ. *effort* – зусилля), що має фізичний сенс «зусилля, напруга» і величиною  $f$  (від англ. *flux* – потік), що має фізичний сенс «швидкість».

Розподіл потоків (зусиль) у вузлових точках зв'язкового графа підкоряється закону збереження енергії, сформульованому у вигляді першого (другого) закону Кірхгофа:

для вузла з одним і тим самим значенням  $f$

$$\sum_k f_k = 0; \quad (7.1)$$

для вузла з одним і тим же значенням  $e$

$$\sum_k e_k = 0. \quad (7.2)$$

На підставі законів (7.1) і (7.2) формуються диференціальні рівняння динаміки досліджуваної системи. Серед елементів динамічної системи виокремлюють: інерційний накопичувач енергії, ємнісний накопичувач енергії, дисипативний елемент, функціональний перетворювач, гіратор.

На входах і виходах системи розташовані джерела зусиль (потоків), що визначають дію з боку більш ширшої системи, у складі якої міститься досліджувана система. Перейдемо до докладного розгляду кожного з елементів.

Динамічний стан інерційного накопичувача енергії у загальному випадку описується рівнянням:

$$e = \frac{d}{dt}(mf), \quad (7.3)$$

де  $f = dq/dt$ ,  $q = q_1(t)$  – координата;

$m = m(t)$  – інерція накопичувача;

$t$  – час.

Зокрема, якщо,  $m = \text{const}$ , то рівняння (7.3) приймає вигляд  $e = m(df/dt)$ .

Інерційним накопичувачем у механічній системі є масивне тіло:

– якщо  $q$  – поступальне переміщення, то  $m$  – маса тіла,  $e$  – сила;

– якщо  $q$  – обертальний рух тіла навколо деякої осі, то  $m$  – момент інерції,  $e$  – момент сили відносно цієї осі.

– якщо в електричній системі функції інерційного накопичувача виконує котушка індуктивності, то  $q$  – заряд, що протікає через поперечний переріз провідника,  $m$  – індуктивність,  $e$  – напруга на клемі котушки.

Ємнісний накопичувач енергії в загальному випадку описується рівнянням:

$$e = \int (kf) dt, \quad (7.4)$$

де  $k(q) = de / dq$  – жорсткість накопичувача.

У більшості інженерних задач жорсткість накопичувачів постійна та рівняння (7.4) використовується у вигляді  $e = k \int f dt$ .

Ємнісним накопичувачем у механічній системі є пружне тіло (пружина): якщо  $q$  – лінійна деформація, то  $k$  – коефіцієнт жорсткості; якщо  $q$  – кутова деформація, то  $k$  – крутильна жорсткість.

В електричній системі ємнісним накопичувачем енергії є конденсатор:  $q$  – заряд на обкладинках конденсатора;  $k = 1/C$  де  $C$  – ємність конденсатора.

Очевидно, що одне й те саме фізичне тіло (електричний провідник) має як властивості інерційного, так і властивості ємнісного накопичувача. Вибраний елемент математично описує тіло або провідник у конкретному завданні. Це залежить від того, яка властивість є більш істотною, і буде враховуватися у розрахунках.

Дисипативний елемент, який перетворює механічну або електричну енергію в теплову енергію, описується рівнянням:

$$e = dR \varphi(f), \quad (7.5)$$

де  $R$  – коефіцієнт, який в загальному випадку є функцією часу.

Найчастіше у рівнянні (7.5) приймають  $R = \text{const}$  и  $\varphi(f) = f$  – лінійний опір із постійним коефіцієнтом. У механічних системах за допомогою дисипативного елемента враховують втрати енергії, що обумовлені наявністю сухого та в'язкого тертя. У електричних системах – це втрати енергії на активних опорах (резисторах).

Функціональний перетворювач перетворює енергію, що подається на його вхід з одними параметрами в енергію того самого виду, але з іншими параметрами. Це описується рівняннями:

$$e_{\text{вих}} = m^{-1} e_{\text{вх}}, \quad f_{\text{вих}} = m f_{\text{вх}}, \quad (7.6)$$

де  $e_{\text{вх}}$ ,  $e_{\text{вих}}$  – зусилля,  $f_{\text{вх}}$ ,  $f_{\text{вих}}$  – потоки на вході та виході перетворювача;  $m$  – коефіцієнт перетворювача.



У загальному випадку  $m$  – є функція часу  $t$ , яка може бути задана неявно. При моделюванні динаміки механічних систем рівняння (7.6) використовуються для математичного опису ідеальних механізмів, зокрема й з рідкими (газоподібними) робочими тілами. В електричних системах – для опису ідеальних перетворювачів електричних сигналів.

Теплові втрати в реальних механізмах і електричних ланцюгах враховуються шляхом додавання в розрахункову модель відповідних дисипативних елементів із наведеними значеннями опору при розв’язанні конкретної задачі.

*Гіратор* (від грец. *gyros* – коло, обертання) перетворює енергію одного виду в енергію іншого виду. Він описується рівняннями

$$e_{вих} = k f_{вх}, \quad f_{вих} = k^{-1} e_{вх}, \quad (7.7)$$

де  $k$  – коефіцієнт гіратора.

Рівняння (7.7) відповідають ідеальному гіратору. При моделюванні гіраторів з урахуванням теплових втрат у розрахункову модель додаються дисипативні елементи. Прикладом гіратора є електричний двигун:

$$M_D = k i_a, \quad \omega_D = k^{-1} e_c; \quad k = k_D \Phi,$$

де  $M_D$  – момент двигуна,

$i_a$  – струм в ланцюзі якоря,

$\omega_D$  – кутова швидкість,

$e_c$  – противо-ЕРС двигуна;

$\Phi$  – магнітний потік двигуна,

$k_D$  – конструктивний коефіцієнт.

Розглянуті елементи мають математичний опис, інваріантний до фізичного походження модельованих систем і процесів, тому метод зв’язкових графів найкраще підходить для використання в задачах математичного моделювання динаміки мехатронних систем. Наявність зв’язкового графа дозволяє візуально проаналізувати динамічні взаємовпливи у досліджуваній системі, а прості закони (7.1) і (7.2) зручні при автоматизованому отриманні рівнянь динаміки.

## **7.5 Моделювання та автоматизація динаміки систем із використанням методу зв'язкових графів**

Зв'язковий граф динамічної системи може бути побудований у двох еквівалентних варіантах. Граф, зв'язки якого не утворюють замкнених контурів, називається безконтурним, в іншому випадку – контурним.

Більш традиційними в задачах моделювання динаміки технічних систем є контурні графи, які набули широкого поширення в електротехніці й гідравліці.

Безконтурні графи менш відомі. Вони застосовувалися окремими дослідниками для моделювання динаміки систем, що складаються з матеріальних точок або з твердих тіл, які роблять прості рухи.

У таблиці 7.2 подані позначення елементів для двох зазначених варіантів зв'язкових графів. Отже, на контурному графі інерційний, ємнісний накопичувачі та дисипативний елемент є двополюсниками, на безконтурному графі – одновходовими елементами.

Функціональний перетворювач і гіратор на контурному графі є чотиріполюсниками, а на безконтурному – двовходовими елементами. Розглянемо деякі приклади математичного моделювання з використанням зв'язкових графів.

З точки зору автоматизації найскладнішим є формування розрахункової схеми, оскільки перехід від реального технічного об'єкта до його розрахункової схеми пов'язаний з необхідністю визначення сукупності факторів і умов, які будуть враховані під час моделювання.

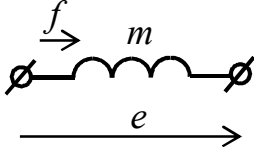
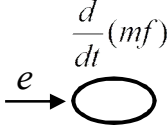
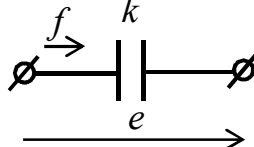
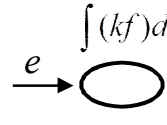
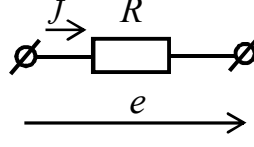
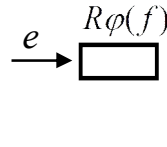
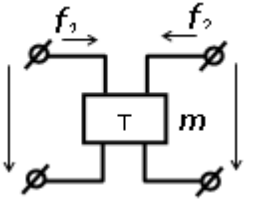
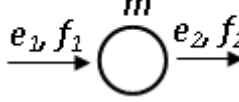
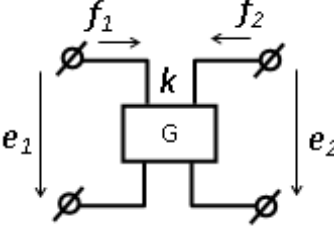
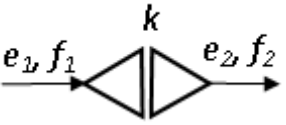
Твердження, згідно з якими одні діючі фактори визнаються істотними, а інші – незначними, ґрунтуються на інженерному досвіді та творчій інтуїції дослідника.

Ця обставина загалом призводить до неможливості повністю автоматизувати процедуру формування розрахункової схеми технічного об'єкта. Виняток становлять лише конструкції, вузли та елементи, для яких існують готові розрахункові схеми.

Наприклад, підшипникові опори валів редукторів, балкові конструкції, типові чотиріполюсники з пасивними електротехнічними елементами і тощо. В інших випадках розрахункова схема, що достатньою мірою відповідає властивостям реального технічного об'єкта, може бути складена лише інженером-фахівцем.

Розглянемо деякі приклади розв'язання задач з використанням методу зв'язкових графів.

Таблиця 7.2 – Позначення елементів

Найменування елемента	Позначення	
	Контурний граф	Безконтурний граф
Інерційний накопичувач енергії		
Ємнісний накопичувач енергії		
Дисипативний елемент		
Функціональний перетворювач		
Гіратор		

**Приклад 1.** Визначити коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) одноступінчастого редуктора з передавальним числом  $u$  (рис. 7.1) як функцію моменту корисного навантаження  $M_H$ . Кутова швидкість шестерні  $\omega_1 = const$ . Момент сил сухого тертя, наведений до вихідного валу:

$$M_T = M_0 + fM_H, \quad (7.8)$$

де  $M_0$  – момент тертя в ненавантаженій передачі;

$f$  – постійний коефіцієнт тертя,  $|f| < 1$ .

Ланки редуктора вважати абсолютно твердими.

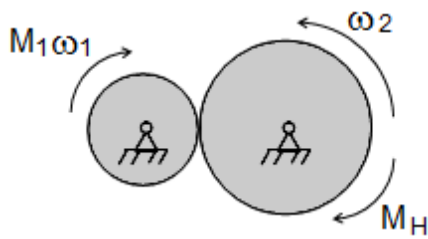


Рисунок 7.1

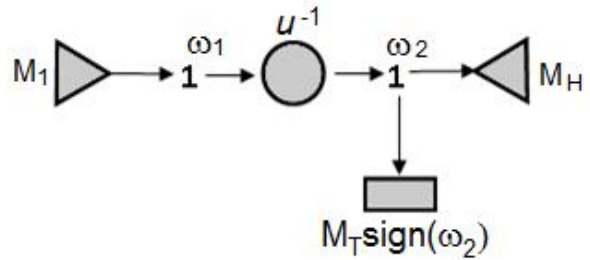


Рисунок 7.2

### Розв'язання

Зв'язковий граф редуктора зображений на рисунку 7.2. Застосовуючи до вузлів графа закон, отримаємо рівняння моментів:

$$M_1 = u^{-1}(M_H + M_T \text{sign}(\omega_2)).$$

Помноживши ліву та праву частини рівності на  $\omega_1$  і враховуючи, що  $\omega_1 = u\omega_2$ , отримуємо рівняння балансу потужності:

$$M_1\omega_1 = M_H\omega_2 + M_T\omega_2\text{sign}(\omega_2). \quad (7.9)$$

Розділивши (7.9) на вхідну потужність  $M_1\omega_1$ , отримаємо  $1 = \eta + \chi$ , де  $\eta$  – ККД редуктора:

$$\eta = M_H / M_1 u;$$

$\chi$  – коефіцієнт втрат на тертя:

$$\chi = M_T \text{sign}(\omega_2) / M_1 u.$$

Шукане рівняння

$$\eta(M_H) = 1 - M_T \text{sign}(\omega_2) / (M_H + M_T \text{sign}(\omega_2)),$$

та графік  $\eta(M_H)$  наведено на рисунку 7.3.

Аналіз графіка показує, що ККД редуктора дорівнює нулю, якщо редуктор не навантажений ( $M_H = 0$ ), і зростає при збільшенні моменту

навантаження, наближаючись до значення, максимально можливого при заданому коефіцієнті тертя.

На практиці найбільше значення ККД досягається при оптимальному для редуктора значенні механічної потужності на вихідному валу.

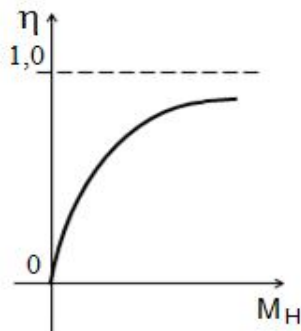


Рисунок 7.3

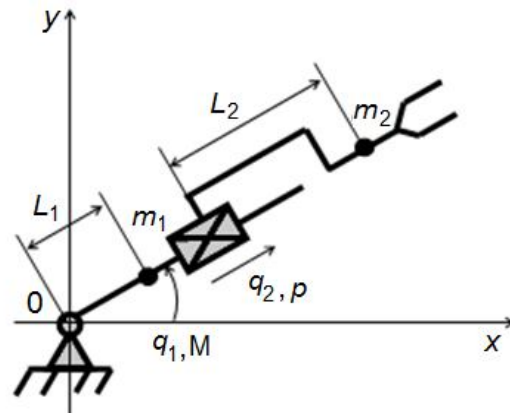


Рисунок 7.4

**Приклад 2.** Отримати рівняння динаміки електромеханічного приводу (рис. 7.5).

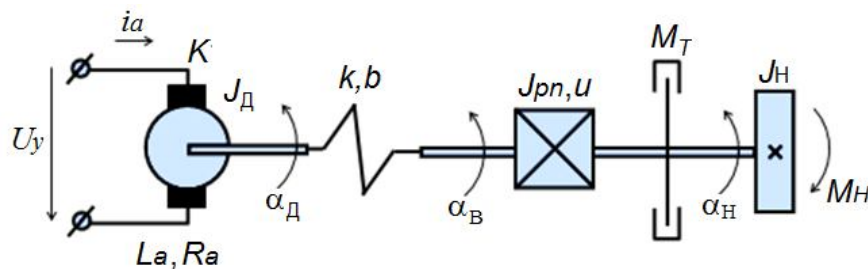


Рисунок 7.5 – Функціональна схема електромеханічного приводу:

$U_y$  – напруга керованого джерела живлення,  $i_a$  – струм у ланцюзі якоря двигуна,  $L_a, R_a$  – індуктивність і активний опір ланцюга якоря двигуна,  $K$  – коефіцієнт двигуна,  $J_D$  – момент інерції ротора двигуна,  $\alpha_D$  – кут повороту ротора двигуна,  $k$  – приведений коефіцієнт жорсткості механічної передачі,  $b$  – приведений коефіцієнт втрат на деформацію,  $\alpha_B$  – кут повороту вхідного валу редуктора,  $J_{pn,u}$  – момент інерції редуктора, приведений до валу навантаження,  $u$  – передавальне відношення редуктора,  $M_T$  – момент сухого тертя, приведений до валу навантаження,  $\alpha_H$  – кут повороту вала навантаження,  $J_H$  – момент інерції навантаження,  $M_H$  – момент навантаження

### Розв'язання

Безконтурний граф приводу зображений на рисунку 7.5, де  $\Delta\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_B, \quad \dot{\alpha}_B, \dot{\alpha}_D, i_a$ .

Рівняння динаміки:

$$\begin{aligned} k(\alpha_D - \alpha_B) + b(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_B) &= u^{-1}[(J_H + J_{pn})\ddot{\alpha}_H + M_T \text{sign}(\dot{\alpha}_H) + M_H] \\ i_a K &= J_D \ddot{\alpha}_D + b(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_B) + k(\alpha_D - \alpha_B), \\ U_y &= L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K \dot{\alpha}_D. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Рівняння (7.10) також можуть бути отримані з контурного графа електричної схеми розглянутого приводу (рис. 7.6), відомим з електротехніки, а саме методом контурних струмів.

Розглянуті приклади ілюструють можливості методу зв'язкових графів у задачах математичного опису динаміки різних, зокрема й фізично неоднорідних, технічних систем.

Викладене дає підставу стверджувати, що метод зв'язкових графів можна розглядати як найзагальніший метод побудови теоретичних моделей динаміки мехатронних систем.

Автоматизована побудова математичної моделі мехатронної системи у формі рівнянь динаміки може здійснюватися в такому порядку:

- 1) на основі заданої розрахункової схеми будується зв'язковий граф системи;
- 2) на основі графа виводяться рівняння динаміки.

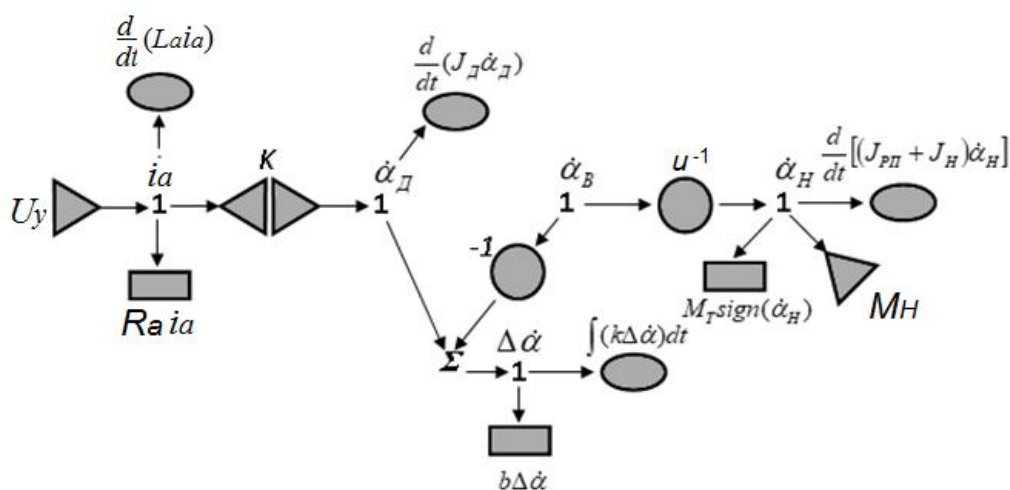


Рисунок 7.6

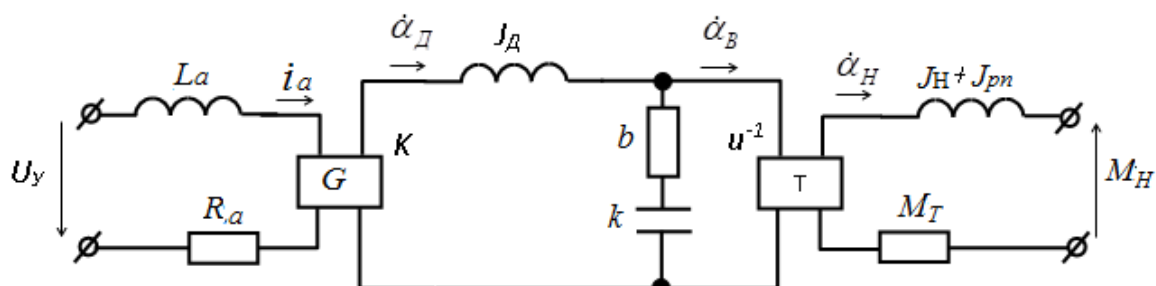


Рисунок 7.7 – Електрична схема приводного механізму

Виконання етапу 1) в автоматичному режимі легко здійснити, якщо заздалегідь відомо число функціональних перетворювачів у системі та їхні коефіцієнти. У цих випадках зв'язковий граф автоматично відтворюється за заданою розрахунковою схемою, оскільки кожному елементу схеми ставиться у відповідність попередньо занесена в базу даних ділянка зв'язкового графа.

На етапі 2) інформація про структуру графа записується в матрицю  $A = [a_{ij}]$ , де  $i$  – номери вузлів;  $j$  – номери зв'язків графа.

При цьому якщо зв'язок  $j$  входить у вузол  $i$ , то  $a_{ij} = 1$ ; якщо зв'язок  $j$  виходить з вузла  $i$  то  $a_{ij} = -1$ ; якщо зв'язок  $j$  не з'єднує вузол  $i$ , то  $a_{ij} = 0$ .

Матриця  $A$ , складена у такий спосіб, називається матрицею інцидентів 2.

Тоді рівняння динаміки системи будуть визначатися рівністю, що виражає у векторно-матричній формі закон:

$$A \cdot e = 0, \quad (7.11)$$

де  $e = e[e_j]$  – вектор зусиль, що передаються по зв'язках графа.

Якщо зв'язок  $j$  здійснюється функціональним перетворювачем із коефіцієнтом  $m$ , то при  $a_{ij} = -1$  (зв'язок  $j$  виходить із вузла  $i$ ) замість зусилля на виході перетворювача  $e_j$  підставляється зусилля на його вході  $me_j$ .

Якщо зв'язок  $j$ , що з'єднує вузли  $i$  і  $k$ , здійснюється *гіратором* із коефіцієнтом  $K$ , то  $a_{ij} = -1$ , і  $e_j = Kf_k$ ,  $a_{kj} = 1$   $e_j = Kf_i$ .

Пронумеруємо всі вузли та зв'язки в графі привода (рис. 7.8).

Номери вузлів виділені жирним шрифтом і курсивом. Матриця значень у цьому разі буде мати вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Вектор зусиль  $e = e[e_j]$ ,  $j = 1, 2, \dots, 14$ . Тоді згідно з (7.11) і з урахуванням дії гіратора по зв'язку 4 а також функціональних перетворювачів зі зв'язків 7, 11 матимемо:

$$A \cdot e = \begin{bmatrix} e_1 - e_2 - e_3 - K\dot{\alpha}_D \\ Ki_J - e_5 - e_6 \\ e_8 - e_9 - e_{10} \\ -e_7(-1) - e_{11}u^{-1} \\ e_{11} - e_{12} - e_{13} - e_{14} \end{bmatrix} = 0. \quad (7.12)$$

Підставивши в (7.12) значення, відповідні зусиллям у зв'язках графа (рис. 7.8), і взявши до уваги вузол  $\Sigma$  із загальним зусиллям  $e_6 = e_7 = e_8$ , отримаємо рівняння, ідентичні (7.10).

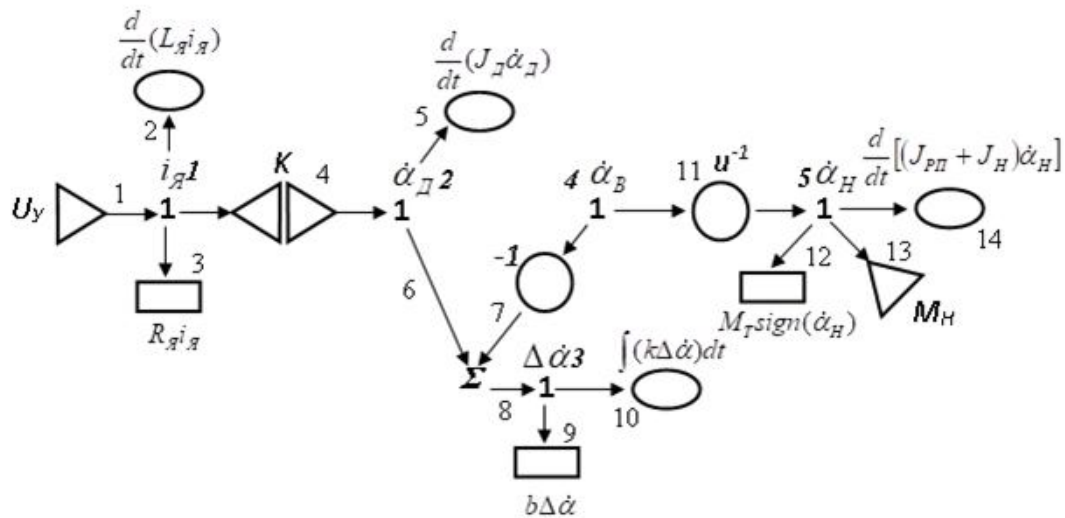


Рисунок 7.8

Автоматизоване моделювання та дослідження динаміки мехатронних систем, що задається користувачем на модельному полі зв'язного графу системи, практично реалізовано в спеціалізованому пакеті програм CAMP-G.

### Контрольні питання

1. Що називається моделлю?
2. Види моделювання.
3. Що називається математичною моделлю?
4. Перелічити форми математичних моделей динаміки.
5. Якими рівняннями описується динаміка мехатронних систем?
6. Що становить метод математичного моделювання ?
7. Що належить до апаратних і програмних засобів автоматизації обчислень?
8. Скільки існує методів отримання рівнянь динаміки багатоланкових механізмів. Перелічити.
9. Показати особливості методу Лагранжа порівняно з методом Ейлера.
10. Що становить модифікований метод Лагранжа?



11. Охарактеризувати метод Гауса. На яких рівняннях він заснований?
12. Проаналізувати метод зв'язкових графів.
13. Які закони простежуються при використанні методу зв'язкових графів?
14. На чому базується метод зв'язкових графів?
15. Що становить поняття «гіратор»?
16. Як відбувається процес моделювання та автоматизації динаміки систем з використанням зв'язкових графів?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

### Базова література

1. Ловейкін В. С. Мехатроніка: навч. посібник / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Ю. В. Човнюк. – Київ : ЦП «Компринт», 2012. – 358 с.
2. Bishop R. H. The Mechatronics Handbook / R. H. Bishop. – Boca Raton : CRC Press, 2002. – 1229 p.
3. Введение в мехатронику: учеб. пособие / [А. И. Грабченко, В. Б. Клепиков, В. Л. Доброскок и др.]. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – 264 с.
4. Подураев Ю. В. Мехатроника. Основы, методы, применение : учеб. пособие для высш. учеб. заведений по спец. «Мехатроника» направления подготовки «Мехатроника и робототехника» / Ю. В. Подураев. – 2-е изд., стереотип. – М. : Машиностроение, 2007. – 256 с.
5. Попович М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електропривод / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – Київ : Либідь, 2005. – 678 с.
6. Яцун М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів : навч. посібник / М. А. Яцун, А. М. Яцун. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
7. Лудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів : організація і управління : підручник / О. А. Лудченко. – Київ : Знання-Прес, 2004. – 478 с.
8. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : навч. посібник / [Є. Ю. Формальчик, М. С. Олісевич, О. Л. Мاستикаш Р. А. Пельо]. – Львів : Афіша, 2004. – 492 с.
9. Антощенко Р. В. Динаміка та енергетика руху багатоеlementних машинно-тракторних агрегатів / Р. В. Антощенко. – Харків : ХНТУСГ, «Міськдрук», 2017. – 244 с.
10. Мехатроніка транспортних засобів та систем / В. О. Алексієв, В. П. Волков, В. І. Калмиков. – Харків : ХНАДУ, 2004. – 176 с.
11. Дудюк Д. Л. Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси : навч. посібник / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, М. М. Мисик. – Львів : «Магнолія плюс» СПД ФО В. М. Піча, 2005. – 278 с.
12. Цвіркун Л. І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посібник / Л. І. Цвіркун, Г. Грулер ; Нац. гірничий ун-т. – 2-ге вид., випр. – Дніпропетровськ : НГУ, 2010. – 224 с.

13. Кузьмин Д. В. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы / Д. В. Кузьмин. – Архангельск : Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. – 120 с.
14. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
15. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике / В. С. Зарубин; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 469 с.
16. Харари Ф. Теория графов / Пер. с англ. и предисл. В. П. Козырева. Под ред. Г. П. Гаврилова. Изд. 2-е. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.
17. Тевяшев А. Д. Канонічний вигляд квадратичної форми. Метод Лагранжа зведення квадратичної форми до канонічного вигляду / А. Д. Тевяшев, О. Г. Литвин // Вища математика : збірник задач. – Харків : СМІТ, 2010. Ч. 1 у 3-х частинах : Лінійна алгебра та аналітична геометрія. – С. 164–166.
18. Яглінський В. П. Моделювання динамічних процесів роботизованого виробництва / В. П. Яглінський, Д. В. Іоргачев. – Одеса : АстроПрінт, 2004. – 234 с.

### Додаткова література

1. Діагностування рухомого складу електричного транспорту : конспект лекцій для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.05070203, 8.05070203 – Електричний транспорт / В. Х. Далека, М. Г. Шульженко, В. І. Коваленко, В. М. Шавкун; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва : – Харків : ХНАМГ, 2011. – 99 с.
2. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Діагностування рухомого складу електричного транспорту» : для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.05070203, 8.05070203 – Електричний транспорт / Харків. нац. акад. міськ. госп-ва ; уклад. : В. Х. Далека, М. Г. Шульженко, В. М. Шавкун. – Харків : ХНАМГ, 2011. – 71 с.
3. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Діагностування рухомого складу електричного транспорту» : для студентів 5 курсу всіх форм навчання спеціальності 7.05070203, 8.05070203 – Електричний транспорт та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203 – Електричний транспорт / Харків. нац. акад. міськ. госп-ва ; уклад. : М. Г. Шульженко, В. М. Шавкун. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 32 с.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### **А**

*Автоматизація 21*

*Автоматика 21*

### **Б**

*Безвідмовність 56*

### **В**

*Виконавчий механізм 14*

### **Г**

*Гексапод 91*

*Гіратор 105*

### **Д**

*Двигун 13*

*Деселерограф 40*

*Деселерометр 40*

*Діагностична система 24*

*Діагностична установка 24*

*Діагностичне обладнання 24*

*Діагностичне устаткування 24*

*Діагностичний комплекс 24*

*Діагностичний пристрій 24*

*Діагностичний стенд 24*

*Довговічність 56*

*Доремонтний ресурс 60*

### **Е**

*Експертна система 34*

*Електричний діагностичний прилад 24*

*Електричні вимірювання 23*

*Електричні вимірювання неелектричних величин 23*

### **З**

*Залишковий ресурс 60*

*Збережуваність 56*

### **І**

*Інтелектуальна мехатронна машина 17*

*Інформаційна діагностична система 36*

### **К**

*Коефіцієнт готовності 68*

*Контролепридатність 68*

### **М**

*Метод зв'язкових графів 101*

*Механізація 21*

*Мехатроніка 8*

*Мехатронний модуль 14*

*Мехатронний модуль руху 15*

*Мехатронні пристрої 29*

*Міжремонтний ресурс 60*

*Мікроконтролер 88*

*Мікропроцесор 87*

*Модель 96*

*Модуль 14*

*Модуль руху 15*

### **Н**

*Надійність 55*

*Надмірність 73*

*Неелектричний діагностичний прилад 24*

*Неелектричні вимірювання 23*

### **О**

*Об'єкт теорії надійності 55*

### **П**

*Подія 61*

*Показник надійності 56*

*Предмет теорії надійності 55*

### **Р**

*Редуктор 13*

*Резервування 70*

*Ремонтопридатність 56*

*Ресурс 56*

*Робочий орган мехатронної машини 18*

### **С**

*Синергетика 8*

*Система адаптації 38*

*Система резервування 38*

*Система самодіагностики 36*

### **Т**

*Термін служби 56*

*Тест 73*

### **Ф**

*Формула Баєса 63*

### **Ю**

*Юстування 69*

*Навчальне видання*

**ПАВЛЕНКО** Тетяна Павлівна,  
**ШАВКУН** Вячеслав Михайлович,  
**КОЗЛОВА** Ольга Сергіївна,  
**ЛУКАШОВА** Наталя Павлівна

## **СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ**

### **НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархасєв*

Редактор *В. І. Шалда*

Комп'ютерний набір *Т. П. Павленко, О. С. Козлова*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

Дизайн обкладинки *Т. П. Павленко,  
Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 30.05.2019. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 6,8.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства ім. О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.